



2ej 17

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**CEMENTACIONES PRIMARIAS DE
TUBERIAS EN POZOS
PETROLEROS**

TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO PETROLERO**

P R E S E N T A :

JORGE HINOJOSA NAVARRO

MEXICO, D. F.

1984



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

	<u>Página</u>
INTRODUCCION	1
1.- INFLUENCIA DE ALGUNAS CARACTERISTICAS DE LAS FORMACIONES SOBRE LAS CEMENTACIONES DE TUBERIAS	3
II.- PROPIEDADES DE LAS LECHADAS DE CEMENTO Y SU CONTROL:	
II.1.- Densidad	6
II.2.- Pérdida de Agua	6
II.3.- Tiempo de Espesamiento	7
II.4.- Viscosidad	7
II.5.- Resistencia a la Compresión	7
II.6.- Aditivos	8
III.- ACCESORIOS PARA CEMENTACION EN LAS TUBERIAS:	
III.1.- Accesorios Internos al Pozo	21
III.2.- Accesorios Superficiales	30
IV.- OPERACIONES PREVIAS A LA CEMENTACION:	
IV.1.- Introducción de la Tuberia de Revestimiento	33
IV.2.- Programa de Criculación	46
V.- METODO DE DISEÑO DE OPERACIONES DE CEMENTACION DE TUBERIAS:	
V.1.- Flujo de Fluidos	49
V.2.- Técnica de Cementación Primaria Bajo un Régimen de Flujo Turbulento	55

	<u>Página</u>
V.3.- Técnica de Cementación Primaria Bajo un Régimen de - Flujo Lamínar	69
V.4.- Técnica de Cementación Primaria por Etapas	71
VI.- EJECUCION DE LA OPERACION DE CEMENTACION:	
VI.1.- Desarrollo de las Operaciones	73
VI.2.- Desplazamiento de la Lechada	76
VII.- EVALUACION DE RESULTADOS:	
VII.1.- Pruebas de Presión	78
VII.2.- Registro Sónico de Cementación	79
VIII.- DISCUSION DE CEMENTACIONES FALLIDAS	87
A P E N D I C E	90
BIBLIOGRAFIA	92

I N T R O D U C C I O N

I N T R O D U C C I O N

La cementación primaria de tuberías de revestimiento en pozos petroleros es una operación cuya importancia es indiscutible, toda vez que constituye un medio indispensable de control del pozo, que de carecer de tal control, puede perderse. Esta operación se efectúa prácticamente desde la iniciación de la perforación, puesto que es necesario introducir y cementar una tubería para colocar las instalaciones superficiales de control del pozo. Durante la perforación, se cementan varias tuberías para aislar horizontes que puedan causar problemas. En la terminación del pozo, la cementación se orienta, fundamentalmente al control de la producción o inyección de fluidos en las formaciones de interés. Por lo tanto, el objetivo de una cementación, es lograr una capa íntegra de cemento que tenga una buena adherencia con la tubería de revestimiento y con la pared del pozo.

La cementación de un pozo, es el proceso de mezclar cemento con agua, formando una lechada, misma que será bombeada a través de la tubería de revestimiento y depositada en el espacio anular formado por la tubería y la pared del pozo.

En el diseño de una lechada de cemento, deberán considerarse factores tales como: Densidad, viscosidad, pérdida de fluido, resistencia a la compresión del cemento fraguado, tiempo de bombeabilidad y algunas otras consideraciones particulares. En el caso de los pozos profundos, el tiempo -

de bombeabilidad es un factor crítico, pues debido a la alta temperatura de fondo, las lechadas deberán diseñarse con un tiempo de espesamiento tal, que permita su colocación segura en el pozo, sin retardarlo excesivamente; ya que esto evitará el desarrollo satisfactorio de la resistencia a la com presión.

Las limitaciones fundamentales que se tienen al efectuar una cementación primaria son: Capacidad del equipo superficial y presión de fracturamiento de la formación. La presión de fracturamiento de la formación no debe excederse, ya que de pasar esto, se inducirán fracturas que facilitarán la pérdida de circulación. Por lo tanto, el procedimiento que debe ob servarse al diseñar una cementación primaria, consiste esencialmente en de terminar la técnica que es posible aplicar bajo las limitaciones mencionadas.

CAPITULO I

INFLUENCIA DE ALGUNAS CARACTERISTICAS DE LAS FORMACIONES SOBRE LAS CEMENTACIONES DE TUBERIAS

En este Capítulo se examina la influencia que, sobre los trabajos de cementación de tuberías ejercen las siguientes características de las formaciones expuestas en los pozos:

- A) *Presión de Formación.*
- B) *Permeabilidad.*
- C) *Fracturamiento Natural o Inducido.*
- D) *Presión de Fracturamiento.*

CAPITULO I

INFLUENCIA DE ALGUNAS CARACTERISTICAS DE LAS FORMACIONES SOBRE LAS CEMENTACIONES DE TUBERIAS

El problema principal que se presenta en la cementación de tuberías - de revestimiento, es la pérdida de fluidos a la formación, debido al desconocimiento parcial de las siguientes características de las formaciones ex puestas en los pozos:

- a) Presión de los fluidos.
- b) Permeabilidad.
- c) Presencia de fracturas naturales o inducidas cuando se corren las tube rias de perforación o de revestimiento.

Formaciones con baja presión, alta permeabilidad o fracturadas, pueden provocar intensa deshidratación de la lechada de cemento, que para con diciones extremas significa:

- Incrementar su densidad.
- Reducir su bombeabilidad.
- Disminuir el área efectiva del espacio anular
- Incrementar las caídas de presión por fricción.

En consecuencia, se aumenta el riesgo de perder la circulación. Por otra parte, si durante la colocación de la lechada de cemento se excede la presión de fracturamiento de la formación, parte o toda la lechada se perderá. Por lo tanto, es de gran importancia el conocimiento previo de las características antes mencionadas, a fin de tomar medidas tendientes a evi tar los efectos aludidos.

La máxima presión que se alcance durante una cementación, en cualquier punto de la formación expuesta, deberá ser siempre menor que la presión de fracturamiento de la formación expuesta en el pozo; de otra manera, se inducirán pérdidas de fluido y circulación.

La presión de fracturamiento de una formación se relaciona con su profundidad, teniéndose a lo largo del pozo, un perfil de presiones, que se denomina "gradiente de presiones de fracturamiento". El gradiente sirve de base para el diseño de la operación de la cementación, no varía substancialmente de pozo a pozo en un campo. Su valor se estima a partir de:

- a) Las presiones de ruptura registradas en las estimulaciones.
- b) Las presiones de ruptura alcanzadas en las cementaciones forzadas.
- c) Las presiones de lodo en los puntos de los pozos en que se han presentado pérdidas de circulación durante la perforación.

Cuando no se disponga de los antecedentes anteriores, la presión de fracturamiento puede obtenerse a partir de la ecuación siguiente, desarrollada para rocas sedimentarias que yacen a profundidades mayores de 1000 metros.

$$P_f = \rho_f D \frac{2 - \mu}{1 - \mu} + S_t \dots \dots \dots (1)$$

Para rocas comprendidas entre 1000 y 3000 metros de profundidad, el módulo de Poisson (μ) varía de 0.18 a 0.27, la densidad (ρ_f) de 2 a 2.6 gr/cm³. y el esfuerzo de tensión (S_t) de 14 a 70 Kg/cm². Tomando como valores medios de cada uno de esos parámetros:

$$\begin{aligned} \mu &= 0.225 \\ \rho_f &= 2.3 \text{ gr/cm}^3. \\ S_t &= 42 \text{ Kg/cm}^2. \end{aligned}$$

Y substituyendo en la ecuación (1), se obtiene:

$$P_f = 0.1334 D + 42 \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

- P_f = Presión de fractura _____ Kg/cm².
- D = Profundidad _____ mts.

Esta ecuación se representa gráficamente (Figura 1), para una mejor comprensión y visualización de la presión necesaria para inducir fracturas a una profundidad dada, recordando que las presiones de cementación deberán ser inferiores a las presiones de fractura correspondientes.

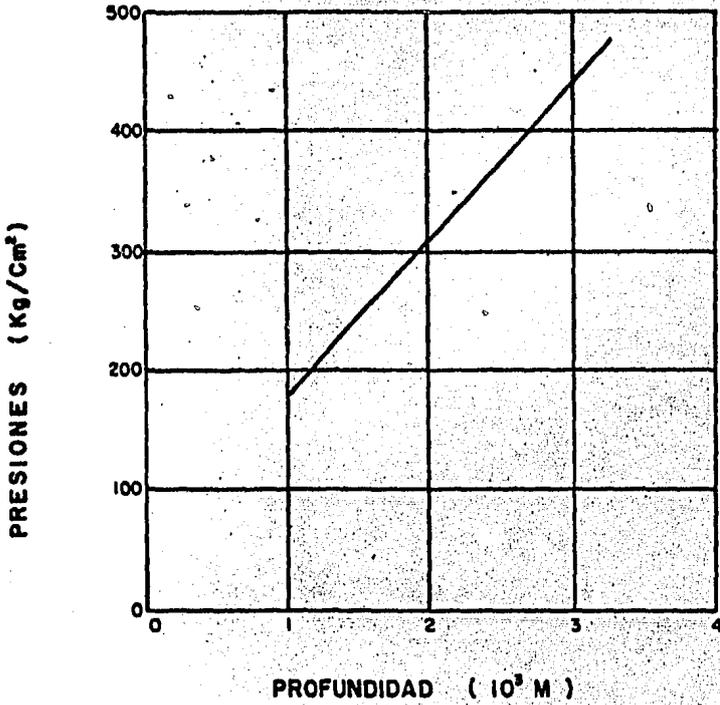


FIG. 1 GRAFICA PARA DETERMINAR LA PRESION NECESARIA PARA INDUCIR FRACTURAS VERTICALES EN FORMACIONES QUE YACEN A PROFUNDIDADES MAYORES DE 1000 M.

CAPITULO II

PROPIEDADES DE LAS LECHADAS DE CEMENTO Y SU CONTROL

*En este Capitulo se indican las principales -
propiedades y características de las lechadas de ce-
mento, su influencia en las cementaciones y su con-
trol.*

C A P I T U L O I I

PROPIEDADES DE LAS LECHADAS DE CEMENTO Y SU CONTROL

Las propiedades de la lechada de cemento se determinan en función de las características de las formaciones y del tiempo de cementación requerido, según la técnica de diseño seleccionada.

A continuación se indican las principales propiedades y características que se deben controlar en la lechada de cemento:

II.1.- DENSIDAD:

Deberá ser tal que contribuya a mantener, durante la operación de cementación, presiones inferiores a las del gradiente de fracturamiento de la formación. Con el propósito de lograr el desplazamiento eficaz del lodo del espacio anular, se recomienda que la densidad de la lechada de cemento, sea mayor que la densidad del lodo de perforación, con una diferencia mínima de 0.25 gr/cm^3 .

II.2.- PERDIDA DE AGUA:

Para cementaciones primarias se recomiendan lechadas que, sometidas en un filtro prensa a 1000 Lbs/pg^2 de presión diferencial durante 30 minutos mantengan una pérdida de agua entre 150 y 400 cm^3 . Lechadas de cemento con pérdidas excesivas de agua originan:

- Incremento en la densidad.
- Reducción en la bombeabilidad.
- Reducción en el área efectiva de flujo en el espacio anular.

- Y por consiguiente, un incremento en las caídas de presión por fricción.

La pérdida de agua se controla a fin de evitar la deshidratación de la lechada, sobre todo cuando se presume la presencia de formaciones muy permeables o de baja presión.

II.3.- TIEMPO DE ESPESAMIENTO:

Deberá permitir el desplazamiento de la lechada de cemento, hasta el lugar predeterminado, teniendo en cuenta que el espesamiento se acelera con:

- El incremento de temperatura.
- Presiones mayores de 5000 Lbs/pg².
- La presencia de componentes inorgánicos.
- La pérdida de agua.

II.4.- VISCOSIDAD:

Deberá mantenerse cerca, pero siempre mayor, a la del lodo de perforación. Con esto se facilita el desplazamiento del lodo y se reducen las caídas de presión por efecto de la viscosidad.

II.5.- RESISTENCIA A LA COMPRESION:

Después de colocar la lechada de cemento, en el espacio anular, es necesario esperar hasta que ésta adquiera una consistencia capaz de sostener a la tubería de revestimiento, antes de continuar con la perforación o terminación del pozo. Se considera que una resistencia a la compresión de 35 Kg/cm². es adecuada para soportar la tubería. Por lo tanto, el tiempo de espera puede conocerse en cada

caso si se toman muestras cilindricas de la lechada, para determinar su resistencia a la compresión, después de los correspondientes tiempos de espera.

El mínimo tiempo de espera puede estimarse por medio de la ecuación (3), desarrollada por R. F. Farris. La expresión mencionada se obtuvo relacionando el tiempo necesario para obtener la consistencia requerida por el cemento, con el tiempo en que se alcanza la máxima presión dentro de la tubería de revestimiento, a partir del inicio del mezclado.

$$t_{woc} = 1.5 t_{\text{máx.}} \dots \dots \dots (3)$$

En la cementación de tuberías de explotación se emplea, generalmente, un tiempo de espera de 24 horas. Se ha demostrado que este tiempo proporciona una seguridad apropiada, como puede observarse de los datos reportados en la Tabla 11.1, donde se presentan las resistencias a la compresión, para los cementos clases A, B, C, D, E, F y G. Estas resistencias se alcanzaron después de 8 y 24 horas de haberse efectuado la mezcla.

11.6.- ADITIVOS:

Los aditivos tienen por finalidad modificar las propiedades de las lechadas de cemento. prácticamente, todos los aditivos de cemento que normalmente se usan son polvos que se han mezclado en seco con el cemento, antes de que éste sea transportado al pozo. No obstante, en caso necesario la mayoría de los aditivos pueden añadirse al agua para mezcla en el sitio de trabajo.

T A B L A II.1

RESISTENCIA A LA COMPRESION PARA CEMENTOS
CLASES: A, B, C, D, E, F y G*

CEDULA Número	PRESION Kg/cm ² .	TEMPERA- TURA (°C)	RESISTENCIA MININA A LA COMPRESION EN Kg/cm ² . PARA CEMENTOS CLASE:						
			A	B	C	D	E	F	G
			E N 8 H O R A S						
-	ATM.	37.7	18	14	21	-	-	-	-
15	55.9	35.0	-	-	-	-	-	-	22
35	209.8	60.0	-	-	-	-	-	-	106
65	209.8	110.0	-	-	-	35.5	-	-	-
85	209.8	143.3	-	-	-	-	35.5	-	-
95	209.8	160.0	-	-	-	-	-	35.5	-
			E N 2 4 H O R A S						
-	ATM.	37.7	126	106	141	-	-	-	-
45	209.8	76.7	-	-	-	70	70	-	-
65	209.8	110.0	-	-	-	141	-	70	-
85	209.8	143.3	-	-	-	-	141	-	-
95	209.8	160.0	-	-	-	-	-	70	-

* Datos obtenidos a partir de pruebas llevadas a cabo reproduciendo las condiciones correspondientes a las especificaciona A.P.I. (Cédulas), mostradas en la primera columna.

Dependiendo de la forma en que se seleccionan, los aditivos afectan - las características de las lechadas y de los cementos fraguados en varias formas. He aquí algunos ejemplos:

- 1.- La densidad varía de 1.25 - 2.9 gr/cm³..
- 2.- La resistencia a la compresión puede variar de 14.06 - 1406.14 Kg/cm²..
- 3.- El proceso de fraguado puede acelerarse o retardarse, para producir un cemento que fragüe en poco tiempo o permanezca fluido hasta por 36 horas.
- 4.- La filtración del cemento puede disminuirse hasta 25 cm³/30 minutos, - cuando se mida con una criba de malla de 325 a una presión diferencial de 1000 Lbs/pg². (70.307 Kg/cm²..).
- 5.- Las propiedades de flujo pueden modificarse en diversas formas, ajustando la viscosidad y otros parámetros.
- 6.- El cemento ya fraguado puede hacerse resistente a la corrosión (densificándolo o variando su composición química).
- 7.- Los reactivos para desarrollar fuerzas de gelatinosidad o materiales granulares, fibrosos o de escamas pueden añadirse para controlar la pérdida de la lechada de cemento.
- 8.- En caso necesario puede moderarse el aumento de temperatura, causado por el calor de fraguado, por la hidratación del cemento.

Los aditivos para cemento, se clasifican como sigue:

- 1.- Catalizadores o aceleradores.
- 2.- Aditivos ligeros.

- 3.- Aditivos para aumentar la densidad.
- 4.- Retardadores.
- 5.- Agentes de control de pérdidas de circulación.
- 6.- Agentes de control de filtración.
- 7.- Reductores de fricción.
- 8.- Materiales especiales.

1.- CATALIZADORES DE FRAGUADO:

Las lechadas de cemento, para emplearse en formaciones poco profundas y a bajas temperaturas, requieren de la catalización para disminuir el tiempo de espesamiento y para acelerar una temprana resistencia, particularmente en formaciones, cuya temperatura es inferior a -37.7°C. , usando los catalizadores, cementos básicos y buenas prácticas mecánicas, puede lograrse una resistencia de 35.15 Kg/cm^2 . en solo 4 horas, en general, esta resistencia se acepta como la mínima para unir y soportar la tubería.

Los catalizadores de uso común, se enumeran en la Tabla II.2.

2.- ADITIVOS LIGEROS:

Las lechadas de cemento puro, preparadas de clase A, B, G ó H, empleando la cantidad de agua recomendada, tendrán una densidad promedio de 1.79 gr/cm^3 ., muchas formaciones no soportarán grandes columnas de cemento de esta densidad. Como consecuencia, existen aditivos, para reducir la densidad. Los aditivos también ayudan a que las lechadas sean más baratas, aumentan el rendimiento y a veces disminuyen la pérdida del filtrado. La densidad de la lechada puede reducirse agregando agua, sólidos de baja densidad o añadiendo ambos.

Los materiales que se usan comunmente en los cementos, como aditivos ligeros, se muestran en la Tabla II.3 en orden de efectividad.

3.- ADITIVOS PARA DENSIFICAR LAS LECHADAS:

Para contrarrestar las altas presiones, a veces encontradas en pozos profundos, se requiere de lechadas de alta densidad. Para aumentar la densidad, el aditivo deberá:

- 1.- Tener la densidad relativa de 4.5 a 5.0.
- 2.- Tener un bajo requerimiento de agua.
- 3.- No reducir en gran parte la resistencia del cemento.
- 4.- Afectar poco el tiempo de bombeo de la lechada.
- 5.- Poseer un tamaño de partícula uniforme.
- 6.- Ser químicamente inerte y compatible con otros aditivos.

Los materiales más comunes que se emplean para densificar los cementos, se encuentran en la Tabla II.4, de ellos, la hematita es la que más se emplea porque es la que logra la densidad mayor.

4.- RETARDADORES DE FRAGUADO:

En las operaciones de perforación de hoy en día, las temperaturas estáticas de fondo son aproximadamente de 76.6 - 260°C., se encuentran a profundidades de 1829 - 7620 m.. Para evitar que el cemento fragüe rápido, deben añadirse retardadores a las lechadas, las cuales pueden colocarse sin riesgo aproximadamente a 2438 m.. El aumento de temperatura acelera el espesamiento, más que el aumento de profundidad (presión). Los retardadores deben ser compatibles con los diferentes aditivos que se emplean en los cementos y también con el cemento mismo.

Los aditivos con altos porcentajes de agua, requieren que el retardador alcance un tiempo de espesamiento deseable. Esto es debido a que:

- 1.- Los materiales de gran área superficial, los cuales en general poseen altos requerimientos de agua, absorberán parte del retardador, dejando una cantidad menor que retarde el fraguado del cemento.
- 2.- El agua adicional diluye el retardador y reduce su efectividad.

Los productos químicos que se emplean actualmente como retardadores, se enumeran en la Tabla II.5.

5.- ADITIVOS PARA EVITAR PERDIDA DE CIRCULACION:

La pérdida de circulación se define como la invasión de cemento o lodo de perforación hacia una formación permeable. Este fenómeno no debe confundirse con la disminución del volumen, debido a la filtración o del volumen requerido para llenar el pozo. Hay dos formas de evitar la pérdida de circulación. La primera, es reducir la densidad del lodo y la segunda es añadir un material obturante a la lechada, o ambos procedimientos. Otra forma de aligerar considerablemente el lodo es agregando nitrógeno. La Tabla II.6, enlista los materiales empleados para el control de pérdida de circulación.

6.- ADITIVOS DE CONTROL DEL FILTRADO:

La pérdida de filtrado de las lechadas se reduce con aditivos para:

- 1.- Evitar la deshidratación prematura o pérdida de agua en zonas porosas, particularmente en cementación de tuberías cortas.

- 2.- Reducir al mínimo el daño a formaciones productoras.
- 3.- Mejorar las cementaciones forzadas.

Una lechada API de clase G 6 H tiene en 30 minutos una pérdida de filtrado de 1000 cm³. a 100 lbs/pg².

Las principales funciones de los aditivos de control de filtración son:

- 1.- Formar películas o membranas, las cuales controlan la pérdida de agua de la lechada y evitar la rápida deshidratación.
- 2.- Mejorar la distribución del tamaño de las partículas, las que determinan cómo el líquido es contenido o atrapado en la lechada.

La Tabla II.7, muestra los aditivos de control de filtración más usados.

7.- REDUCTORES DE FRICCIÓN O AGENTES DESPERSANTES:

Los agentes dispersantes se añaden a las lechadas para mejorar sus propiedades de flujo. Las lechadas que contienen agentes dispersantes, tienen menos viscosidad y pueden bombearse en turbulencia a bajas presiones, disminuyendo así los caballos de fuerza requeridos y reducen las pérdidas de circulación, y deshidratación prematura.

Los dispersantes que se añaden por lo común a las lechadas son:

- Polímeros orgánicos.
- Los agentes de pérdida de filtrado, sal (cloruro de sodio).

Se han empleado a bajas temperaturas, debido a que retardan el ce-
mento ligeramente. Los lignosulfonatos de calcio-aleaciones de ácidos
orgánicos retardan y generalmente, se usan en altas temperaturas.

8.- ADITIVOS ESPECIALES:

a) Descontaminadores de Lodo:

Se usa para neutralizar la contaminación de los lodos trata-
dos con sustancias químicas.

b) Polvo de Sílice:

Se emplea principalmente para incrementar la resistencia del
cemento.

c) Rastreadores Radioactivos:

Los rastreadores radioactivos, se añaden a las lechadas como
marcadores que pueden ser detectados por medio de registros geofl-
sicos. Pueden emplearse para determinar la colocación de las ci-
mas del cemento y para la distribución de una cementación forzada.

T A B L A I I . 2

CATALIZADORES DE USO COMUN EN EL CEMENTO

CATALIZADOR	CANTIDAD EMPLEADA % EN PESO DE CEMENTO	TIPO DE CEMENTO	COMO SE EMPLEA
Cloruro de calcio (CaCl ₂) (escamas, polvo)	De 2 a 4	Cualquier tipo API	Seco o con agua
Cloruro de sodio	De 3 a 10* 1.5 a 5	Cualquier tipo API	Seco o con agua
Formas semihidratadas de yeso	De 20 a 100	Clase API, A, B, C, G ó H	Sólo seco
Silicato de sodio (Na ₂ SiO ₂)	De 1 a 75	Clase API, A, B, C, G ó H	Solo o con agua
Cemento con dispersantes y agua reducida	De 0.5 a 1.0	Clase API, A, B, C, G ó H	Solo o con agua
Agua de mar.	-	Clase API, A, B, C, D, E, G ó H	Como agua de mezcla

* Por ciento en peso de agua

TABLA II.3

ADITIVOS LIGEROS

TIPO DE MATERIAL	CANTIDAD EMPLEADA EN GENERAL
- Bentonita - Tierra diatomacea	- Del 2 al 16 por ciento. - 10, 20, 30 ó 40 por ciento. *
HIDROCARBUROS NATURALES	
- Gilsonita - Carbón - Peruta - Nitrógeno	- De 1 a 50 Lbs/saco de cemento. - De 5 a 50 Lbs/saco de cemento. - De 5 a 20 Lbs/saco de cemento. - Del 0 al 70 por ciento (dependien do de la p.T. y P.)*
O T R O S	
- Puzolana - Silicato de sodio	- 74 Lbs/saco - De 1 a 7.5 Lbs/saco de cemento.

* p, T y P. = Densidad, Temperatura y Presión.

T A B L A II.4

ADITIVOS PARA AUMENTAR LA DENSIDAD
(Cantidad usada por saco de 50 Kg. de cemento)

M A T E R I A L	LIBRAS	KILOGRAMOS
Hematita	4.68 a 121.7	2.11 a 55.2
Barita	11.7 a 126.4	5.26 a 57.3
Arena	5.85 a 144	2.7 a 65.3
Limnita	5.85 a 117	2.7 a 53.0
Sal	5.85 a 18.7	2.7 a 8.54
Dispersante	0.585 a 2.0	0.23 a 0.92

T A B L A II.5

RETARDADORES DE USO COMUN

M A T E R I A L	CANTIDAD A EMPLEAR (% POR EL PESO DEL CEMENTO)
Lignina	0.1 - 1.0
Acido orgánico	0.1 - 2.5
Carboximetil Hidroxietil celulosa	0.1 - 1.5
Borax	0.1 - 0.5
Sal	14 - 16

T A B L A 11.6

MATERIALES OBTURANTES QUE SE ANADEN COMUNNENTE A LAS LECHADAS PARA EVITAR PERDIDA DE CIRCULACION

T I P O	M A T E R I A L	NATURALEZA DE LAS PARTICULAS	CANTIDAD EMPLEADA	AGUA REQUERIDA
Granular	Gilsonita	Granular	De: 5 a: 50 Lb/saco	4 Gal/50 Lb.
	Perlita	De expansión	De: 1/2 a: 1 pie ³ /saco	4 Gal/pie ³
	Corteza de nogal	Granular	De: 1 a: 5 Lb/saco	0.85 Gal/50 Lb.
	Carbón	Granular	De: 1 a: 10 Lb/saco	2 Gal/50 Lb.
Hojuelas	Celofán	Laminares	De: 1/8 a: 1/2 Lb/saco	Ninguna.
Fibroso	Nylon	Fibras cortas	De: 1/8 a: 1/4 Lb/saco	Ninguna.

T A B L A II.7

ADITIVOS PARA CONTROL DE FILTRADO

TIPO Y FUNCION DEL ADITIVO	CANTIDAD RECOMENDADA	TIPO DE CEMENTO	COMO SE EMPLEA
Polímeros orgánicos (celulosa) para formar películas	De 0.5 a 1.5 % por el peso de cemento.	Toda clase	Mezclado en seco.
Polímeros orgánicos (dispersantes) para mejorar la distribución de partículas y formar películas.	De 0.5 a 1.25 % por el peso del cemento.	Toda clase	Mezclado en seco o con agua de mezcla.
Carboximetil hidroxietil celulosa. Para formar películas.	De 0.3 a 1.0 % por el peso del cemento	Toda clase	Mezclado en seco o con agua de mezcla
Aditivos de latex. Para formar películas	1.0 Gal/saco	Toda clase	Mezclado en seco o con agua de mezcla
Cemento de bentonita con dispersante. Para mejorar la distribución de partículas.	1.0 de dispersante.	Clases: A, G ó H	Mezcla por baches.

CAPITULO III

ACCESORIOS PARA CEMENTACION EN LAS TUBERIAS

Este Capitulo se refiere a la descripción y funciones de los accesorios que se instalan en las tuberías por cementar en los pozos.

CAPITULO III

ACCESORIOS PARA CEMENTACION EN LAS TUBERIAS

Los accesorios que se utilizan en las cementaciones primarias, una vez definidas las características de la tubería de revestimiento por cementar, se seleccionan de acuerdo con las características de las formaciones, condiciones del agujero y técnica de cementación programada.

Con el propósito de facilitar el examen de los accesorios requeridos en las operaciones de cementación primaria, estos se clasifican en:

III.1.- Accesorios internos al pozo.

III.2.- Accesorios superficiales.

III.1.- ACCESORIOS INTERNOS AL POZO:

En esta sección se describen las funciones de los accesorios utilizados dentro del pozo al efectuar una cementación primaria.

III.1.1.- Zapatas de cementación.

III.1.2.- Coples de cementación.

III.1.3.- Raspadores.

III.1.4.- Centradores.

III.1.5.- Tapones de desplazamiento.

III.1.6.- Unidades sellantes.

III.1.1.- Zapatas de Cementación:

Es una pieza de unos 40 cm. de material perforable, la cual va enroscada y soldada en la parte inferior de -

tubería de revestimiento y sirven para guiarla y protegerla durante su introducción al pozo. Además, dependiendo de su tipo, permiten o evitan el paso de lodo a través de ellas. Se clasifican en guía flotadora y de control de flujo o diferencial.

La zapata guía permite el paso de los fluidos, en ambos sentidos. Se usa en la cementación de tuberías su per fer icia les e intermedias. Fig. 2

La zapata flotadora únicamente permite el paso de los fluidos desde el interior de la tubería al espacio anular. Origina un efecto de flotación que reduce considerablemente el peso de la tubería sobre la torre o mástil de perforación, el esfuerzo que realizan: Motores, malacate y polipasto (juego de poleas y cable). Su uso requiere como se verá posteriormente, que la tubería se corra sin sobrepasar una velocidad determinada de acuerdo a las características de formación y condiciones del pozo. De lo contrario, se desarrollan presiones que probablemente dañan a las formaciones por penetración del lodo. Este tipo de zapata se usa en la cementación de tuberías intermedias, y en caso necesario, para la ce men ta ci ón de tuberías de explotación. Fig. 3

La zapata de control de flujo o diferencial se comporta como zapata guía durante la corrida de la tubería, y una vez que se ha llegado a la profundidad deseada, se acciona su mecanismo interno para que actúe como zapata flotadora. Este tipo de zapata evita el desarrollo de altas presiones instantáneas. Se emplea en la ce men ta ci ón de tuberías de explotación y de tuberías interme-

días, principalmente en formaciones depresionadas o con alta permeabilidad.

Existe además, otro tipo de zapata denominada "zapata empacadora" y puede ser guía o flotadora. Por su construcción, proporciona un sello entre la tubería de revestimiento y el agujero, evitando así que, tanto la lechada de cemento como la presión de circulación, se manifiesten por debajo de ella.

Se opera soltando una canica desde la superficie, la cual asienta en la zapata, impidiendo el paso de fluidos a través de ella y permitiendo levantar la presión dentro de la tubería. El aumento de presión da lugar a que esta zapata empaque con la pared del agujero, accionando simultáneamente un mecanismo que abre una junta de circulación comunicando el interior de la tubería de revestimiento con el espacio anular. Por la comunicación establecida se desplaza la lechada de cemento al espacio anular.

Esta zapata se utiliza en formaciones que presentan problemas de pérdida de circulación o cuando se requiere cementar la tubería de modo que quede situada en la parte superior de la formación productora.

III.1.2.- Coples de Cementación:

Es una pieza de unos 50 cm. de material perforable, el cual va enroscado y soldado entre el primero y segundo tramo.

a) Coples para Cementación:

Tiene por finalidad retener el o los tapones de desplazamiento. Dependiendo de su función, se clasifican en: Cople de retención y cople flotador.

El cople de retención y el cople flotador permiten el paso de los fluidos en igual forma que la zapata guía y flotadora respectivamente. Se emplean en los mismos casos que estas zapatas, pero evitando combinar cople flotador con zapata diferencial o zapata guía.

El cople de retención o el cople flotador se coloca un tramo de tubería arriba de la zapata de cementación cuando se utilizan dos tapones de desplazamiento, y dos o más tramos arriba cuando sólo se utiliza un tapón de desplazamiento. Fig. 2

b) Coples Para Cementación por Etapas:

Los coples para cementación por etapas están provistos de un mecanismo que permite comunicar el interior de la tubería de revestimiento con el espacio anular. Son diseñados de modo que dejan pasar los tapones de desplazamiento utilizados para la colocación de la lechada en las etapas inferiores. Se abren por medio de un dispositivo que, al asentar en el cople, permite elevar la presión, ocasionando que se deslice una camisa y se establezca la comunicación al espacio anular. Una vez que se ha abierto el cople, puede efectuarse la etapa correspondiente de cementación. El tapón que va colocado entre la -

lechada de cemento y el fluido desplazante, al llegar al cople, ajusta en una segunda camisa que se desliza al aumentar la presión que actúa sobre el tapón, cerrando la comunicación previamente establecida.

El número requerido de coples de este tipo en una operación, es igual al número de etapas programadas menos una, ya que la primera etapa se realiza análogamente a una cementación primaria convencional. Cada cople se coloca en la parte inferior del intervalo que se quiera cementar.

III. 1.3.- Raspadores o Limpiadores de Pared:

Se utilizan para desplazar el enjarre del lodo de las paredes del agujero, procurando así una mejor adherencia del cemento. Se clasifican en dos tipos. El primero trabaja con el movimiento vertical de la tubería, desplazándose entre anillo tope o collarines de retención; el segundo se fija a la pared de la tubería, accionándose con el movimiento rotatorio de la misma. Los raspadores comunmente usados consisten de un anillo metálico sobre el que se asegura un haz de alambre, con el propósito de limpiar las paredes del pozo de la película de lodo. Existe otro tipo de raspador que en lugar de alambres, está provisto de cables de acero dispuestos en la forma helicoidal mostrada en la Fig. 4a. Estos raspadores, cuando se introducen con la tubería, están expuestos a una acción abrasiva menos intensa que los raspadores de alambre (), además presentan la ventaja de adaptarse fácilmente al diámetro real del agujero, sin ofrecer restricciones al flujo.

Debe tenerse presente que, aunque al eliminar la película de lodo se mejora la adherencia entre cemento y pared del agujero, en el caso de formaciones con alta permeabilidad, la eliminación del enjarre puede ocasionar pérdidas de fluido que, en casos extremos, darán lugar a pérdidas de circulación.

La operación de los raspadores o limpiadores de pared se limita a cubrir los intervalos de interés, esto es, los permeables, accionándolos durante la última etapa de circulación.

La distribución de los raspadores se determina de acuerdo al desplazamiento que se da a la tubería en el movimiento vertical. Por ejemplo, si el desplazamiento máximo de la tubería es de un tramo, la distribución será:

- En el primer tramo, tres raspadores, separados con dos collarines tope, colocados a $1/3 L$ y $2/3 L$.
- Del segundo tramo hasta dos tramos arriba de la zona de interés, se colocarán dos raspadores, separados con un collarín colocado a $L/2$, siendo L , la longitud de un tramo.

Si el desplazamiento de la tubería durante el movimiento vertical es menor que la longitud de un tramo, la distribución anterior se modifica aumentando un raspador y un collarín por tramo. Los collarines, en el primer tramo, se colocarán a $1/4 L$, $1/2 L$ y $3/4 L$ y en los demás tramos a $1/3 L$ y $2/3 L$.

III.1.4.- Centradores:

Tienen por finalidad centrar la tubería en el agujero, manteniendo un espacio anular uniforme en toda la longitud del intervalo a cementar, facilitando así el desplazamiento del lodo del espacio anular, previniendo la canalización del cemento y, evitando pegadura de la tubería por presión diferencial.

La distribución de los centradores se determina en función del diámetro de la tubería, diámetro del agujero y desviación; así como curvatura del agujero. Se considera que para agujeros casi rectos, una separación de 27 m. entre centradores es satisfactoria.

La distribución de centradores en agujeros desviados se presenta en la Tabla III.1.

Por razones de seguridad, en agujeros relativamente rectos, la distribución de centradores se modifica, colocando un centrador por tramo para cubrir 60 m. arriba y abajo de la zona de interés.

T A B L A III.1

SEPARACION ENTRE CENTRADORES PARA AGUJEROS DESVIADOS

DIAMETRO DE LA TUBERIA:	5 1/2"	6 5/8"	7"		
DIAMETRO DEL AGUJERO:	7 7/8"	8 3/4"	8 3/4"	8 3/4"	9 7/8"
INCLINACION EN GRADOS	SEPARACION (m)				
2	28.1	31.1	21.9	18.9	33.5
4	23.8	26.8	18.1	15.2	27.7
6	21.6	23.8	15.8	13.1	25.1
8	20.1	21.9	14.2	11.6	22.9
10	18.9	20.7	13.2	10.7	21.4
20	15.9	17.1	10.2	7.9	16.7
30	14.0	15.2	8.8	6.7	13.7
40	12.8	14.3	7.9	5.8	13.1

Existen en el mercado centradores de diseño especial, provistos de -
 álabes que desvían y aceleran el flujo, propiciando el establecimiento de
 régimen turbulento. En esta forma, se logra desplazar el lodo que ha que-
 dado depositado en cavidades o ensanchamientos locales del agujero.

III.1.5.- Tapones de Desplazamiento:

Su función es evitar la contaminación de la lechada de cemento con el lodo de perforación, situando un tapón como elemento separador, entre ambos fluidos. Durante la cementación se utilizan dos tipos de tapones: El primero limpia el interior de la tubería y el segundo separa la lechada de cemento del lodo de perforación.

Los tapones de desplazamiento se colocan en la cabeza de cementación. El primero está provisto de un diafragma que se rompe al incrementar la presión, permitiendo el paso de los fluidos. Este tapón se emplea adelante del fluido dispersante de arcillas. El segundo tapón, construido de un material perforable, se emplea para separar la lechada de cemento del fluido desplazante.

En toda cementación primaria, en que la longitud de la tubería a cementar es mayor de 1000 m., es conveniente utilizar los dos tapones. Si se emplea únicamente el segundo tapón, será necesario colocar el cople de retención a una distancia suficiente de la zapata, de modo que todos los residuos desplazados por el tapón queden dentro de la tubería. Estos residuos contaminan la parte inferior de la lechada de cemento, formando una mezcla de lodo y cemento que fragua dentro de la tubería y que, posteriormente, hay que limpiar. Por lo tanto, a mayor distancia requerida entre cople y zapata, mayor tiempo para limpiar la tubería.

III.1.6.- Unidades Sellantes:

Como el fraguado del cemento es un proceso exotérmico, la tubería de revestimiento sufre un alargamiento -

por dilatación y posteriormente (una vez que el cemento ha fraguado y se restituyen las condiciones normales de temperatura dentro del pozo) una contracción. Este fenómeno provoca que falle la adherencia entre el cemento y la tubería, propiciando la canalización de los fluidos - producidos o inyectados. Experimentalmente se ha comprobado la separación de la tubería del cemento, a pesar de que se libere la presión dentro de la tubería de revestimiento, después de que el segundo tapón de desplazamiento llega a su posición.

Para evitar el paso de fluidos a través del espacio anular así formado, se emplean dispositivos denominados "unidades sellantes" (Fig. 4b), que se aseguran a la tubería de revestimiento por medio de prisioneros ocultos. Las unidades sellantes no presentan ningún obstáculo a la cementación, ya que su espesor es igual al de los coples. Están provistas de copas de hule, que sellan contra las paredes del cemento, evitando el paso de los fluidos. Deben instalarse 5 ó 6 m. arriba y abajo de la formación productora.

III.2.- ACCESORIOS SUPERFICIALES:

A continuación se describen las funciones de los accesorios - empleados en la superficie al efectuar una cementación primaria.

III.2.1.- Cabeza de Cementación:

La cabeza de cementación es un dispositivo que sirve para lanzar un tapón en el momento oportuno.

La cabeza de cementación es un niple cerrado de longitud y diámetro variable que va enroscado en la parte superior de la tubería de revestimiento. Está provisto de dispositivos laterales para conectar las líneas que conducen: La lechada de cemento proveniente de la unidad cementadora y el lodo utilizado para el desplazamiento - enviado desde las bombas de perforación. Fig 5.

En toda cementación primaria se debe utilizar cabeza de cementación de igual diámetro interior a la tubería que se va a cementar, con el objeto de asegurar la correcta operación de los tapones de desplazamiento.

III.2.2.- Unidad Cementadora:

La unidad cementadora está constituida por dos bombas de alta potencia, con su tablero de control y dos tanques o depósitos, en los que se mide el volumen de agua utilizado durante la cementación. Una de las bombas succiona el agua de los depósitos y alimenta al mezclador, proporcionándole el agua necesaria para obtener la lechada de cemento. La otra bomba succiona la lechada y la envía al pozo a través de las líneas que unen la unidad cementadora con la cabeza de cementación.

III.2.3.- Mezclador:

En este dispositivo se efectúa la mezcla agua-cemento. Su forma es semejante a la de un embudo con la parte ancha hacia arriba en la cual se vierte el cemento. Está provisto en la base de dos unidades que permiten conectar la línea de alimentación de agua y la línea de descarga de lechada. La primera línea se une a una de -

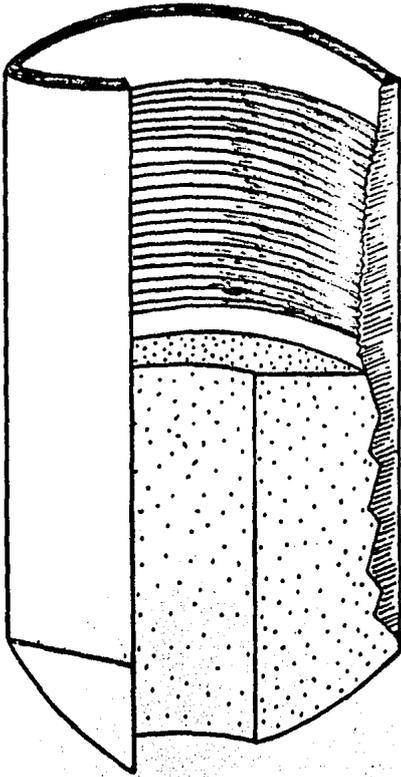
Las bombas de la unidad cementadora y la segunda línea - descarga la mezcla de cemento a un depósito, del que es succionada por la otra bomba y enviada al pozo.

Con el propósito de controlar la densidad de la lechada, ésta se determina periódicamente, tomando muestras del depósito mencionado; o bien, se registra en forma continua, por medio de un dispositivo electrónico colocado en la línea de succión de la bomba que desplaza la lechada al pozo.

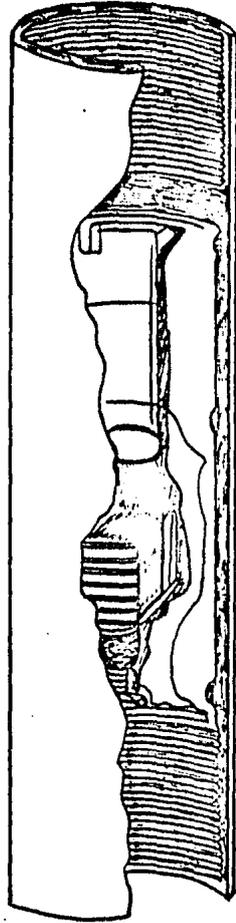
III.2.4.- Bombas del Equipo de Perforación:

Las bombas son indispensables en toda operación de la cementación de tuberías de revestimiento, ya que se emplean para desplazar la lechada al espacio anular, - usando lodo de perforación como fluido desplazante. La velocidad de desplazamiento se determina según la técnica de cementación empleada. En el Capítulo V, se describe el procedimiento para calcular la velocidad de desplazamiento.

Es conveniente disponer de instalaciones que permitan operar estas bombas, ya sea individualmente, en serie o en paralelo, para así desplazar la lechada de cemento al espacio anular bajo las condiciones determinadas en el diseño de la cementación.



ZAPATA GUIA



COPELE DE FLOTACION

FIG. 2



ZAPATA FLOTADORA

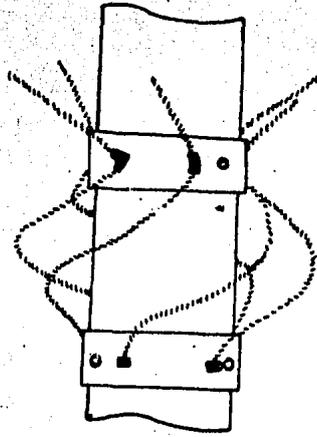


TAPON SUPERIOR

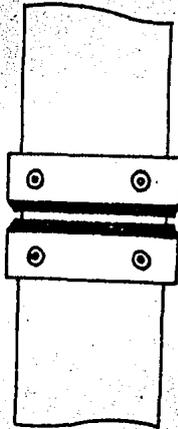


TAPON INFERIOR

FIG. 3

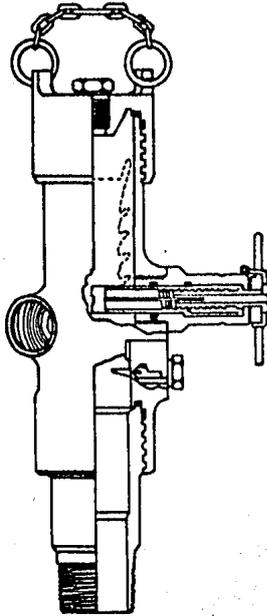


(a)



(b)

FIG. 4 a) RASPADOR DE PARER PROVISTO DE CABLES PARA REMOVER LA PELICULA DE LODO.
b) UNIDAD SELLANTE.



CABEZA DE CEMENTACION

FIG. 5

CAPITULO IV

OPERACIONES PREVIAS A LA CEMENTACION

Este Capitulo trata de los trabajos que es necesario realizar, desde antes de introducir la tubería de revestimiento en el pozo, hasta el momento de iniciar la operación de cementación.

C A P I T U L O I V

OPERACIONES PREVIAS A LA CEMENTACION.

Las operaciones previas a la cementación comprenden lo siguiente: Limpieza de las paredes del agujero del enjarre del lodo por raspadores; introducción de la tubería de revestimiento hasta la profundidad programada, sin dañar las formaciones y acondicionamiento del lodo, hasta dejarlo con las características adecuadas para efectuar la cementación. La introducción de la tubería en el pozo y la circulación de lodo se consideran puntos claves en las operaciones previas a la cementación.

IV.1.- INTRODUCCION DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO:

Para comprender la importancia de esta operación, debe tenerse presente que las presiones instantáneas desarrolladas en el fondo del pozo, al bajar la tubería, pueden originar pérdidas de lodo y que la tubería se pegue debido a la sedimentación de partículas.

La presión instantánea que actúa en el fondo del pozo, al introducir la tubería de revestimiento, es igual a la suma de: La carga hidrostática debida al peso de la columna de fluidos en el espacio anular, la presión necesaria para compensar la pérdida de energía por fricción al ascender el lodo por el espacio anular, considerando que tanto la tubería como los fluidos están en movimiento y la presión necesaria para vencer la inercia del lodo.

La presión instantánea, se refiere a la presión máxima al bajar la tubería, y ocurre en un momento que es difícil de calcular, ya que éstas no actúan en el mismo momento. Para tener un margen de seguridad, se suman las presiones y es la presión que se toma como referencia en la introducción de las tuberías de revestimiento.

Las velocidades alcanzadas al bajar un tramo de tubería de revestimiento, en un tiempo de 10 segundos, se representan gráficamente por la curva (1) que aparece en la Fig. 6, se puede considerar representativa para el caso de colocación de tubería de 6 5/8" a profundidades mayores de 1500 m. La curva (2) muestra las aceleraciones correspondientes a la variación de velocidades mostrada. Se observa que la aceleración máxima se alcanza al iniciarse el movimiento. Las disminuciones bruscas en la curva de aceleración son debidas a que el operador aplica el freno del equipo, progresivamente con más fuerza, ocasionando cambios en la velocidad. La velocidad sigue aumentando hasta alcanzar un máximo a los 4 segundos, instante en que, por efecto del freno, la aceleración pasa a valores negativos, dando lugar a que la velocidad se reduzca hasta la detención total del movimiento al cabo de 10 segundos.

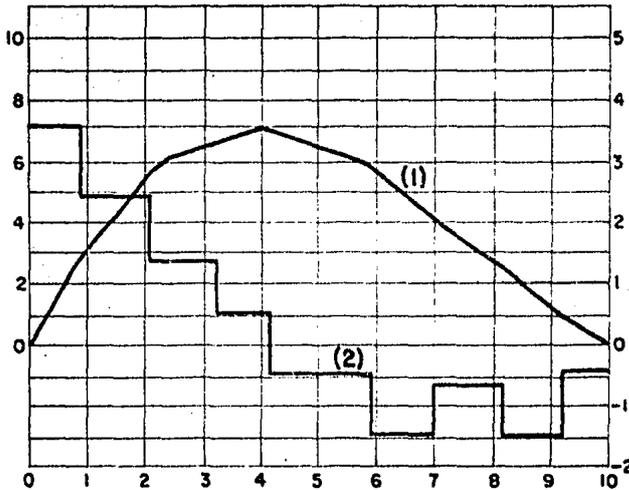
Cabe notar que la gráfica de la Fig. 6 no es una curva ideal, ni es representativa de todas las formas de operación, debe tomarse en cuenta que la acción del operador es complementaria a la acción del freno amortiguador.

IV.1.1.- Procedimiento de Cálculo:

Las ecuaciones de Dunn, Nuss y Beck para flujo plástico y las ecuaciones de Pigott para flujo turbulento, se usaron para calcular las caídas de presión por fricción, tanto dentro de la tubería de revestimiento y en el espacio anular. El equivalente de velocidad de flujo usado para calcular caídas de presión en el espacio anular, fue promedio aritmético de la velocidad de flujo con respecto a la pared fija y a la tubería en movimiento.

A continuación se indica, el procedimiento para determinar las presiones de fondo instantáneas que se generan -

VELOCIDADES INSTANTANEAS (PIES/SEG.)



ACELERACIONES INSTANTANEAS (PIES/SEG.)

TIEMPO (SEG.)

FIG. 6 VARIACION DEL MOVIMIENTO DE UNA TUBERIA DE 6-5/8", RANGO 3, EN UN TIEMPO DE 10 SEG. A PROFUNDIDADES MAYORES DE 1500 M.

durante la introducción de la tubería. Las unidades se manejan en sistema inglés, debido a la facilidad de utilizarla en las ecuaciones antes descritas.

A efecto de conocer la velocidad que se le puede aplicar al lodo de perforación dentro de una tubería, se calcula la velocidad crítica, utilizando la siguiente fórmula:

La velocidad crítica de interés práctico para el ingeniero, es aquella velocidad por debajo de la cual toda turbulencia es amortiguada por la acción de la viscosidad del fluido.

a)

$$V_c = \frac{8.07 \mu P + 8.07 \sqrt{\mu P^2 + 1.65 \tau_y \rho' d_e^2}}{\rho' d_e} \dots (4)$$

$$d_e = d_n - d_o$$

Donde:

V_c = Velocidad crítica ————— pies/seg.

μP = Viscosidad plástica ————— cP

τ_y = Punto cedente de Bingham — lb/100 pies²

ρ' = Densidad ————— lb/pie³

d_e = Diámetro hidráulico ————— Pg.

d_n = Diámetro del agujero ————— Pg.

d_o = Diámetro externo de la tubería. ————— Pg.

Esta velocidad es la máxima que puede imponerse al lodo de perforación dentro de un régimen de flujo laminar. - Pasando del valor obtenido se considera flujo turbulento.

- b) Con el propósito de definir el tipo de flujo prevaleciente, se determina la velocidad equivalente. Esta velocidad se deriva del hecho de que el fluido se mueve a través de un ducto, que no tiene una pared, sino dos paredes, y la velocidad del fluido no es la misma en ambas paredes, por tener diferentes coeficientes de fricción y además la pared del tubo es móvil y la otra es estática.

$$V_e = V_t \left[\frac{d_o^2}{d_t^2 - d_o^2} + \frac{1}{2} \right] \dots \dots \dots (6)$$

Si: $V_e > V_c$, el régimen de flujo es turbulento.

Si: $V_e < V_c$, el régimen de flujo es laminar.

Donde:

V_e = Velocidad equivalente ——— pies/seg.

V_t = Velocidad de la tubería ——— pies/seg.

d_o = Diámetro externo de la tubería ——— Pg.

d_t = Diámetro del agujero ——— Pg.

- c) Si el flujo es turbulento, calcúlese el número de Reynolds, para la velocidad de la tubería, si el flujo es laminar, continúese con el inciso (d).

$$N_{Re} = \frac{396 d_e \rho' V_t}{\mu P} \left[\frac{D_t}{L_t A_a} + \frac{A_p}{A_a} + 0.181 \right] \dots \dots (7)$$

Donde:

N_{Re} = Número de Reynolds adimensional.

D_t = Desplazamiento de la tubería $\frac{\text{Pie}^3}{\text{tramo de tubería}}$

L_t = Longitud de tubería $\frac{\text{Pie}^3}{\text{tramo de tubería}}$

A_a = Área del espacio anular Pies^2 .

A_p = Área proyectada por los coples de la tubería Pies^2 .

d_e = Diámetro hidráulico Pg .

ρ' = Densidad Lb/pie^3 .

V_t = Velocidad de la tubería Pie/seg .

μ_p = Viscosidad plástica cP

Con el número de Reynolds obtenido y por medio de la Figura 7, obténgase el coeficiente de fricción correspondiente.

- d) Calcúlese las caídas de presión por fricción para el régimen de flujo prevaeciente por medio de las ecuaciones siguientes:

Para Flujo Turbulento:

$$P'_f = \frac{1296 \times 10^{-6} f L \rho' V_t^2}{d_e} \left[\frac{D_t}{L_t A_a} + \frac{A_p}{A_a} + 0.181 \right]^2 \dots (8)$$

Donde:

P'_f = Pérdidas de presión por fricción Lb/pg^2 .

f = Factor de fricción de Fanning Adimensional

L = Longitud Pies

ρ' = Densidad Lb/pie^3

V_t = Velocidad de la tubería — Pies/seg.

d_e = Diámetro hidráulico — Pg.

D_t = Desplazamiento de la tubería — Pies³/tramo de tubería

L_t = Longitud de tubería — Pies/tramo de tubería

A_a = Área del espacio anular — Pies².

A_p = Área proyectada por los coples de la tubería — Pies².

Para Flujo Lamínar:

$$P'_f = \frac{L \tau_y}{225 d_e} + \frac{\mu_p L V_t}{1500 d_e} \left[\frac{D_t}{L_t A_a} + \frac{A_p}{A_a} + 0.46 \right] \dots (9)$$

Donde:

P'_f = Pérdidas de presión por fricción — Lb/pg².

L = Longitud — Pies

τ_y = Punto cedente de Bingham — Lb/100 pies².

μ_p = Viscosidad plástica — cP

V_t = Velocidad de la tubería — Pies/seg.

d_e = Diámetro hidráulico — Pg.

D_t = Desplazamiento de la tubería — Pies³/tramo de tubería

L_t = Longitud de tubería — Pies/tramo de tubería

A_a = Área del espacio anular — Pies².

A_p = Área proyectada por los coples de la tubería — Pies².

e) Calcúlese la presión necesaria para acelerar el lodo - de perforación, utilizando la siguiente fórmula:

$$P_{ac} = 2155 \times 10^{-7} \rho' L a_t \left[\frac{D_t}{L_t A_a} + \frac{A_p}{A_a} \right] \dots (10)$$

Donde:

- P_{ac} = Pérdidas de presión por aceleración _____ Lb/pg².
- ρ' = Densidad _____ Lb/pies³.
- L = Longitud _____ Pies
- a_t = Aceleración de la tubería _____ Pies/seg².
- D_t = Desplazamiento de la tubería _____ Pies³/tramo de tubería
- L_t = Longitud tubería _____ Pies/tramo de tubería
- A_a = Area del espacio anular _____ Pies².
- A_p = Area proyectada por los coples de la tubería _____ Pies².

f) Cuantifíquese la carga hidrostática debida al peso de la columna de fluidos en el espacio anular utilizando la siguiente fórmula:

$$P_{ha} = 0.007 \rho' D' \dots \dots \dots (11)$$

Donde:

- P_{ha} = Presión hidrostática en el espacio anular _____ Lb/pg².
- ρ' = Densidad _____ Lb/pie³.
- D' = Profundidad _____ Pies

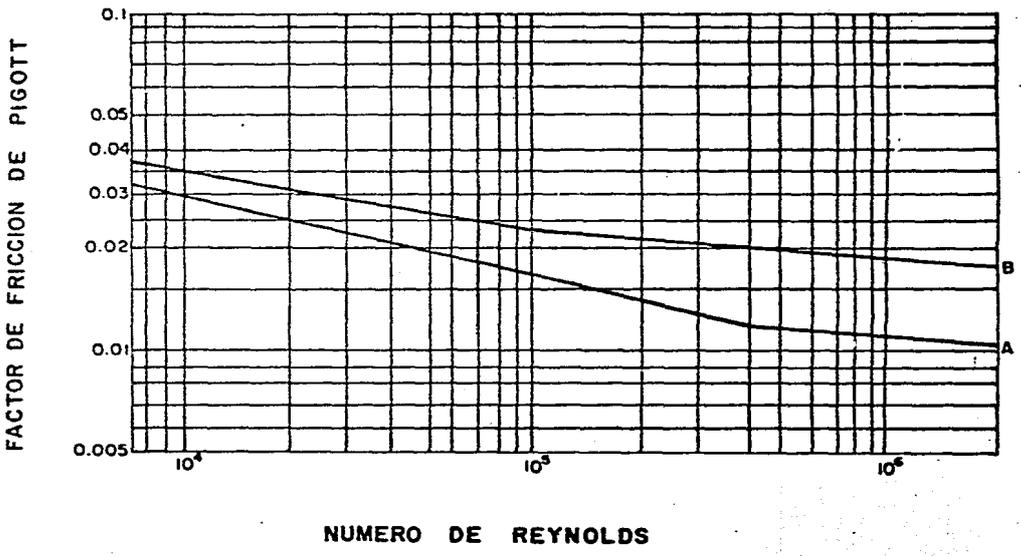
g) Para determinar la presión máxima en el fondo del pozo, se utiliza la siguiente fórmula:

$$P_w = P'_f + P_{ac} + P_{ha} \dots \dots \dots (12)$$

Donde:

- P_w = Presión en el fondo del pozo _____ Lb/pg².

- P'_f = Pérdidas de presión por -
fricción _____ Lb/pg².
- P_{ac} = Pérdidas de presión por -
aceleración _____ Lb/pg².
- P_{ha} = Presión hidrostática en -
el espacio anular _____ Lb/pg².



A- EN TUBERIA

B.- EN EL ESPACIO ANULAR

FIG. 7 FACTOR DE FRICCION VS NUMERO DE REYNOLDS PARA USARSE CON LA ECUACION DE PIGATT EN FLUJO TURBULENTO.

EJEMPLO 1:

Calcúlese la presión instantánea que actúa en el fondo de un pozo, al introducir tubería de 6 5/8", N-80, 28 lb/pie, cople largo, rango 3 y provista de equipo de flotación, en agujero de 8 5/8". - Se tienen, además, los siguientes datos:

Longitud por tramo de tubería de <u>re</u> vestimiento	40	Pies
Desplazamiento por tramo	9.61	Pies ³ .
Densidad del lodo	112	Lb/pie ³ .
Viscosidad plástica del lodo	35	cP
Punto cedente de Bingham	15	Lb/100 pies ² .
Profundidad del pozo	9840	Pies

Considerando que la Fig. es un registro típico de velocidades, se tiene:

Velocidad máxima de la tubería	7	Pies/seg.
Aceleración de la tubería	0.5	Pies/seg ² .
Tiempo empleado para introducir un <u>tra</u> mo de tubería	10	Seg.

En vista de que la máxima presión instantánea ocurre cuando se alcanza la velocidad máxima al introducir la tubería, el ejemplo se resolverá para esas condiciones, siguiendo el procedimiento descrito anteriormente.

a) Velocidad crítica del fluido de perforación:

$$V_c = \frac{8.07 \times 35 + 8.07 \sqrt{35^2} + 1.65 \times 112 \times 15 \times 4}{112 \times 2}$$

$$V_c = 5.2 \text{ Pies/seg.}$$

b) Velocidad equivalente del fluido en el espacio anular:

$$V_e = 7 \left(\frac{43.89}{30.46} + \frac{1}{2} \right)$$

$$V_e = 13.58 \text{ Pies/seg.}$$

Se observa que la velocidad equivalente del fluido en el espacio anular es mayor que la velocidad crítica. Por lo tanto, las pérdidas de presión deben calcularse para un régimen turbulento.

c) Número de Reynolds y factor de fricción:

$$N_{Re} = \frac{396 \times 2 \times 112 \times 7}{35} \left(\frac{9.61}{40 \times 0.1663} + 0 + 0.181 \right)$$

$$N_{Re} = 28\,740$$

De la Fig. se obtiene:

$$f = 0.030$$

d) Pérdidas de presión por fricción:

$$P'_f = \frac{1296 \times 10^{-6} \times 0.03 \times 9840 \times 112 \times 49}{2} \left(\frac{9.61}{40 \times 0.1663} + 0 + 0.181 \right)$$

$$P'_f = 2771.460 \text{ Lb/pg}^2.$$

e) Presión necesaria para vencer la inercia del lodo de perforación:

$$P_{ac} = 2155 \times 10^{-7} \times 112 \times 9840 \times 0.5 \left(\frac{9.61}{40 \times 0.1663} + 0 \right)$$

$$P_{ac} = 170.96 \quad \text{Lb/pg}^2.$$

f) *Presión hidrostática:*

$$P_h = 0.007 \times 112 \times 9840$$

$$P_h = 7714.56 \quad \text{Lb/pg}^2.$$

g) *Presión instantánea que actúa en el fondo del pozo.*

$$P_w = 277.46 + 170.96 + 7714.56$$

$$P_w = 10656.98 \quad \text{Lb/pg}^2.$$

El gradiente de presión instantánea para las condiciones su-
puestas del problema es:

$$G_p = \frac{P_w}{D'} = \frac{10656.98}{9840}$$

$$G_p = 1.08 \quad \text{Lb/pg}^2/\text{pie}$$

Un gradiente de presión instantánea de 1.08 Lb/pg²/pie es ca-
paz de fracturar cualquier tipo de formación, como puede observarse
en la Fig. . Con frecuencia, durante la introducción de la tube-
ría en el pozo, se originan fracturas en las formaciones, las cua-
les en algunos casos, pueden conducir a pérdidas de circulación du-
rante la cementación.

La solución gráfica del procedimiento descrito en la sección -
IV.1.1, se presenta en la Figura . Su uso se ilustra en el ejem-
plo siguiente:

EJEMPLO 2 :

Determinar el tiempo mínimo en que debe introducirse una tubería de revestimiento de 6 5/8", rango 3, provista con equipo de flocación, en un pozo de 8 5/8" y 3000 m. de profundidad. Longitud de tubería dentro del pozo: 2000 m. La densidad del lodo de perforación es de 1.3 gr/cm³. y la presión de fractura de la formación es de 445 Kg/cm²..

Haciendo referencia a la Fig. 8 : Con la profundidad del pozo (3000 m.) y la densidad del lodo (1.3 gr/cm³.) se define el Punto (a). Desde (a) y desplazándose paralelamente al eje de profundidad, se localiza (b) en la intersección con la vertical levantada desde la presión total del fondo (445 Kg/cm².). Prosigase horizontalmente hasta (c) y de aquí, continúese según las curvas que sirven como guías hasta cortar el eje de longitud de tubería dentro del pozo (2000 m.), Punto (d). Obténgase (e) trazando una horizontal desde (d) hasta la densidad del lodo (1.3 gr/cm³.). Bajando una vertical desde (e) se determina un tiempo de introducción por tramo de 14 segundos.

Se sigue el procedimiento en forma análoga descrito en el párrafo anterior, para diferentes longitudes de tubería dentro del pozo y mismos datos, se obtienen los siguientes resultados:

PROFUNDIDAD (m.)		TIEMPO MINIMO DE INTRODUCCION POR TRAMO (seg.)
De:	A:	
0	1000	10.0
1000	1500	12.0
1500	2000	14.0
2000	2500	16.0
2500	3000	17.0

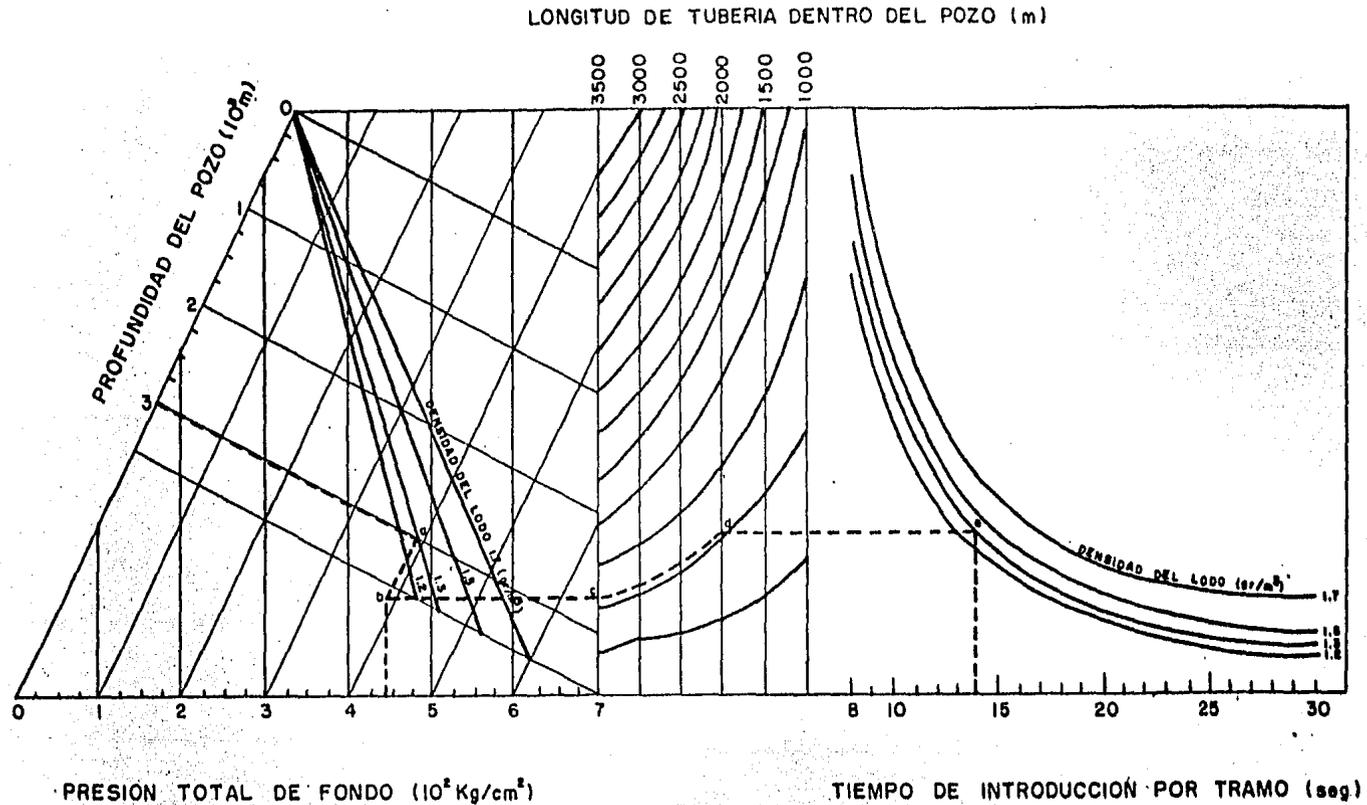


FIG. 8 GRAFICA PARA DETERMINAR EL TIEMPO MINIMO POR TRAMO, REQUERIDO PARA INTRODUCIR TUBERIA DE REVESTIMIENTO DE 6 5/8" EN AGUJERO DE 8 5/8" SIN FRACTURAR LA FORMACION.

IV.1.2.- Discusión:

Analizando las ecuaciones (8), (9) y (10), que intervienen en el cálculo de las presiones instantáneas, se observa que son directamente proporcionales a las velocidades de la tubería en el pozo e inversamente al área de flujo del espacio anular. Por lo tanto, el problema de presiones instantáneas puede resolverse de tres formas:

- a) Introduciendo la tubería en el pozo, a una velocidad inferior a la necesaria para ocasionar un gradiente de presión instantánea capaz de fracturar las formaciones expuestas en el pozo.
- b) Programando los diámetros de agujeros y tuberías en tal forma que se obtengan mayores áreas de flujo en el espacio anular.
- c) Utilizando coples y zapatas de control de flujo o diferenciales, que permiten llenar la tubería simultáneamente con su introducción al pozo. De esta manera, se disminuye el gasto medio de fluido desplazado y se reducen las pérdidas de presión por fricción.

La solución más aceptable, desde el punto de vista económico y de ingeniería, consiste en la aplicación combinada de las formas indicadas en "A" y "C". El costo extra que origina la introducción de tubería a una velocidad adecuada y provista de zapata diferencial, está muy por debajo del ocasionado cuando surgen problemas a consecuencia de las presiones instantáneas desarrolladas en el fondo del pozo.

IV.2.- PROGRAMA DE CIRCULACION:

Durante la introducción de la tubería de revestimiento, es necesario circular periódicamente, con la finalidad de homogeneizar - la columna de lodo de perforación dentro del pozo. Se recomienda - circular cada vez que se introduzcan de 25 a 30 tramos, procurando que, durante las etapas programadas de circulación, la zapata de la tubería quede frente a zonas densas. Con esto, se reduce la posibi lidad de inducir pérdidas de lodo frente a zonas permeables.

Una vez alcanzada la profundidad a la que se llevará a cabo la cementación, se procede a efectuar la última etapa de circulación, - imprimiéndole simultáneamente a la tubería, un movimiento vertical alternado, con el propósito de que actúen los raspadores. Esta eta pa se prolongará el tiempo necesario para dejar el lodo, limpio de los residuos desprendidos de la pared del pozo por acción de los - raspadores.

Cuando la tubería de revestimiento no quede centrada en el agujero, se recomienda combinar el movimiento vertical con movimiento rotatorio. La ventaja que presenta el movimiento rotatorio se muestra gráficamente en la Fig. 9. En (a) se muestra la distribución de velocidades en el espacio anular, durante el desplazamiento cuando el movimiento impuesto a la tubería es vertical y alternado, indicándose una zona l que permanece inmóvil. En (b), (c) y (d) se observa como el lodo que en (a) permanecía inmóvil, es arrastrado - por efecto del movimiento rotacional de la tubería.

Después de homogeneizada la columna de lodo de perforación, se introduce el primer tapón de desplazamiento colocando a continuación cierto volumen de solución de lavado, a base de un dispersante de arcillas, cuya función es limpiar las paredes del pozo para que

se logre una mejor adherencia del cemento a la formación. El volumen necesario de esta solución varía entre 2 y 10 m³., dependiendo del tipo de solución, sección del espacio anular, intervalo a cementar y de la base del lodo de perforación

Para el lavado de paredes del espacio anular que han puesto en contacto con lodos a base de aceite, es conveniente usar la técnica siguiente:

1.- Colocar, en seguida del primer tablón de desplazamiento y con el propósito de efectuar un lavado inicial en el espacio anular, - 2 m³. de cualquiera de los siguientes solventes para aceite y - asfalto:

- Aceite diesel.
- Kerosina.
- Disulfuro de carbono.
- Benzeno.
- Tolueno.
- Xileno.

Aunque el disulfuro de carbono es el más efectivo, el bajo costo del aceite diesel o de la kerosina hacen más práctico su empleo.

2.- Colocar a continuación del solvente aludido en (1), 2 m³. de - cualquiera de los siguientes solventes para agua y aceite:

- Grupo de los etilen.
- Alcohol isopropilico.
- Alcohol butil terciario.
- Dietilen glicol-monetil éter.

3.- Colocar la lechada de cemento inmediatamente atrás del segundo bache de solvente.

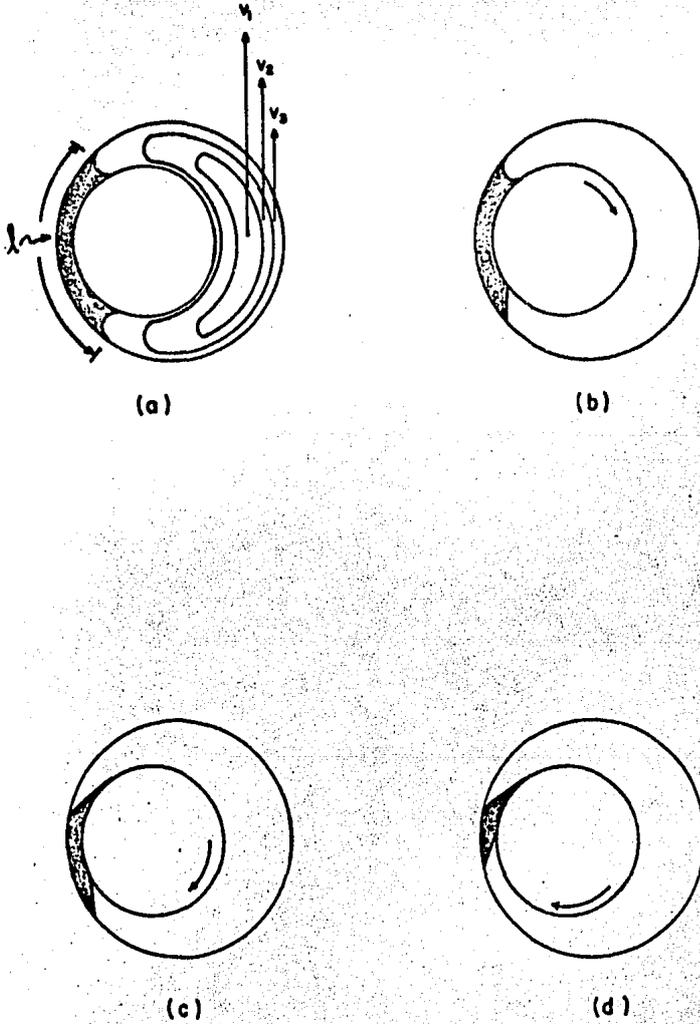


FIG.9 EFECTO DEL MOVIMIENTO ROTACIONAL DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO SOBRE EL DESPLAZAMIENTO DEL LODO DE PERFORACION.

CAPITULO V

METODO DE DISEÑO DE OPERACIONES EN CEMENTACIÓN DE TUBERIAS

*En este Capítulo se examinan las técnicas -
comúnmente empleadas en los trabajos de cemen-
tación primaria de tuberías.*

C A P I T U L O V

METODO DE DISEÑO DE OPERACIONES DE CEMENTACION DE TUBERIAS

Debido a las continuas fallas en las cementaciones primarias; fallas debido a que la lechada de cemento, no ocupa el lugar debido entre tubería de revestimiento y espacio anular, se han llevado a cabo estudios en los - cuales se ha tratado de mejorar dichas fallas. Por lo tanto, aquí se examinar los métodos para lograr una lechada correctamente diseñada y su adecuada colocación en el espacio anular.

El estudio de la reología de los fluidos ha ayudado a determinar el - medio de desplazamiento completo del lodo de perforación en el espacio anular para obtener un buen llenado con la lechada de cemento.

Reología es el estudio del flujo y la deformación de los fluidos.

V.1.- FLUJO DE FLUIDOS:

La clasificación del flujo de los fluidos se ha hecho de acuerdo con las propiedades reológicas de los mismos y de su tipo de escurrimiento.

Aquí se estudia el flujo de fluidos, lodo de perforación y lechada de cemento en los ductos correspondientes en los pozos.

A) Clasificación de Flujo de los Fluidos de Acuerdo con su Tipo de Escurrimiento:

De acuerdo con las experiencias de Osborne Reynolds, quien comprobó el flujo laminar por la vena fluida coloreada, la cual

introdujo dentro de un fluido en movimiento, observando que durante el escurrimiento de dicho fluido permanecía sin mezclarse cuando la velocidad de escurrimiento no excedía ciertos límites.

Los trabajos de Reynolds dependen no solo de la velocidad de escurrimiento, sino también de la viscosidad, diámetro del ducto y la densidad.

De acuerdo con esto, Reynolds determinó dos regímenes de flujo:

- Flujo laminar o de Poiseville.
- Flujo turbulento.

El número de Reynolds es un parámetro de flujo por el cual son fijados los regímenes anteriores mencionados:

$$Re = \frac{d v \rho}{\mu}$$

Donde:

Re = Número de Reynolds, sin dimensiones.

d = Diámetro de la tubería, en cm.

v = Promedio de velocidad del flujo, cm/seg.

ρ = Densidad, gr/cm³.

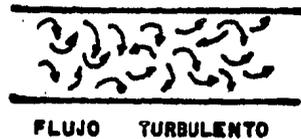
μ = Viscosidad del fluido, Poises.

Puesto que el número de Reynolds no tiene dimensiones, cualquier sistema de unidades usado dará el mismo valor numérico.

De acuerdo con las experiencias de Reynolds, cuando un líquido tiene escurrimiento menor de 2100, el régimen de flujo es del tipo laminar, y turbulento si el número de Reynolds es mayor de 3000.

Ahora para ver en una forma más simple los dos tipos de regímenes de flujo, se ilustran los siguientes ejemplos:

Si la velocidad de movimiento del fluido es muy pequeña, entonces sus partículas seguirán trayectorias paralelas al ducto, o dicho en otra forma, si las partículas se mueven a lo largo de una tubería de sección transversal circular, lo harán en anillos concéntricos; las partículas que están en contacto con la pared de la tubería casi no se moverán, en cambio acercándose más al centro la velocidad aumentará. A este tipo de flujo se le llama comúnmente flujo laminar en los fluidos Newtonianos y flujo viscoso en los fluidos no Newtonianos. Ahora si en la misma tubería la velocidad de flujo se aumenta, entonces las características de flujo laminar desaparecen y entonces el movimiento de las partículas se vuelve de trayectoria irregular y forman pequeños remolinos, cruzándose unos con otros, ocasionando con ello que al chocar con la pared interior de la tubería se rompan y después volverán a formarse estos remolinos. A este tipo de flujo se le llama flujo turbulento.



B) Clasificación de Fluidos de Acuerdo con las Propiedades Reológicas:

De acuerdo a las propiedades reológicas, los líquidos se clasifican en Newtonianos y no Newtonianos. La diferencia entre unos y otros, se establece de la siguiente manera:

$$\mu = \frac{F/A}{V/D}$$

En donde:

$$\frac{F}{A} = \text{Esfuerzo cortante.}$$

$$V/D = \text{Velocidad de corte.}$$

En los líquidos Newtonianos no varía la viscosidad en diferentes condiciones de flujo, mientras no cambie la temperatura y presión; esto es al cambiar las condiciones de flujo, variarán en forma proporcional el esfuerzo cortante, con respecto a la velocidad de corte, como se muestra en la Fig. 10

Esto significa que los líquidos Newtonianos inician su movimiento inmediatamente después que se les aplica una presión, sin importar su magnitud y además se mueven a una velocidad directamente proporcional a la presión aplicada.

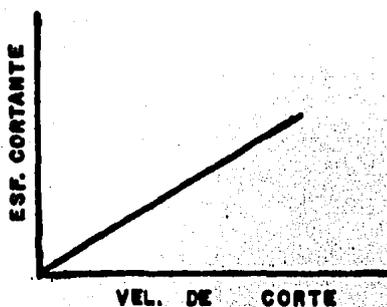


FIG. 10

Como ejemplo de estos flúidos, tenemos el agua, aceites del gados, alcoholes y otros.

Flúidos No Newtonianos:

Dentro de estos flúidos son considerados los flúidos plásti cos, los cuales necesitan un incremento de presión para que em-- piecen y se mantengan en movimiento; si esta presión disminuye, - dejarán de moverse aún antes de que anule la presión y la veloci dad a la que se mueven no es una función lineal de la calda de - presión.

Plasticidad:

Es la propiedad que tienen los flúidos no newtonianos de - ser deformados continua y permanentemente en cualquier dirección; pero sin fluir bajo una fuerza que no exceda el valor de la ce-- dencia. La plasticidad está dada en centipoises, esto es, unida des de viscosidad.

Valor de Cedencia:

Es aquel en el cual la presión aplicada a un flúido plásti co excede la resistencia de éste al movimiento y por consiguien te el flúido empieza a moverse. Tiene unidades de presión: - -- Kg/cm²..

C) El Flujo Turbulento:

En el caso particular del flujo turbulento se forman 2 pel lículas de flúido adyacentes a la pared de la tubería; la primera película de flúido es con movimiento laminar y tiene un espesor de varias milésimas de pulgada y la segunda película es de va - rias centésimas de pulgada de grueso, moviéndose, no en líneas - rectas; sino onduladas. La mayor porción del cuerpo del flúido se considera dentro del flujo turbulento con las partículas mo-- viéndose en forma circular a grandes velocidades.

Muchas de las partículas chocan contra la pared de la tubería deformando la película del fluido en estado laminar.

D) Ventajas del Flujo Turbulento en Cementaciones Primarias:

Cuando se obtiene un flujo turbulento en el espacio anular, tanto del lodo como de la lechada; durante una cementación de tubería de revestimiento, las partículas del fluido giran en todas direcciones a altas velocidades produciendo fuertes impactos en las paredes del espacio anular y la tubería, los cuales logran desprender la película de lodo de las paredes de la formación y la tubería.

Cuando se logra desprender completamente la película de lodo o enjarre resultan los siguientes puntos de suma importancia:

- a) El contacto directo del cemento con la tubería y la formación.
- b) Una buena liga a través del cemento, entre la formación y la tubería.
- c) Mínima contaminación del cemento con los lodos de perforación.

E) Factores que Influyen en Contra de un Flujo Turbulento:

Los factores que influyen en contra de un flujo turbulento, son los siguientes:

- a) Caída de presión por fricción, reduciendo la velocidad.
- b) Pérdida de fluido del cemento a la formación, aumentando la viscosidad.
- c) Densidad de la lechada de cemento.

- d) *Alta viscosidad de la lechada.*
- e) *Insuficiente capacidad de bombeo.*

La técnica a utilizar en una cementación primaria, debe seleccionarse en función de las características de las formaciones expuestas en el pozo, las propiedades de la lechada y el equipo de cementación disponible.

Las técnicas comúnmente empleadas en los trabajos de cementación primaria son: Cementación primaria bajo un régimen de flujo turbulento, cementación primaria bajo un régimen de flujo laminar y cementación primaria por etapas.

V.2.- TECNICA DE CEMENTACION PRIMARIA BAJO UN REGIMEN DE FLUJO TURBULENTO:

G.C. Howard y J.B. Clark establecieron que cuando se utiliza régimen de flujo turbulento, se obtiene un desplazamiento más efectivo del lodo en el espacio anular, lográndose, por consiguiente, una mejor adherencia entre el cemento y la pared del pozo. Sin embargo, - debido a las altas presiones requeridas para obtener flujo turbulento, la aplicación de esta técnica queda limitada a formaciones cuyo gradiente de fracturamiento sea mayor que el gradiente de presiones ejercidas por la columna de lodo y cemento, así como la disponibilidad de equipo de bombeo con capacidad suficiente para llevar a cabo la operación en esa forma.

Se anticipa que el hecho de establecer flujo turbulento, durante la colocación de la lechada de cemento en el espacio anular, no siempre garantiza una buena eficiencia de desplazamiento, a pesar de que se tomen las medidas necesarias en cuanto a movimiento de la tubería, colocación de raspadores y centradores.

Basta analizar la ecuación del número de Reynolds para inferir que dado un gasto fijo de desplazamiento, aunque sea bajo, es posible, reduciendo la viscosidad, alcanzar régimen turbulento. La disminución de viscosidad se logra mediante el uso de aditivos. Sin embargo, las lechadas de cemento con baja viscosidad, aún en régimen turbulento, conducirán a bajas eficiencias de desplazamiento, debido al fenómeno de interdigitación que tenderá a desarrollarse.

Para establecer el diseño de una cementación primaria, bajo un régimen de flujo turbulento, es necesario determinar, como primer paso, la máxima presión de fondo que se alcanzaría bajo las condiciones de operación más favorables y compararla con la presión de fracturamiento de las formaciones existentes, con el propósito de definir si es posible aplicar esta técnica. De no ser posible, se procede a efectuar el diseño siguiendo la técnica de cementación bajo un régimen de flujo laminar. En caso afirmativo, se continúa el diseño cuantificando la potencia requerida en el equipo superficial de bombeo, el volumen de lechada y el tiempo de desplazamiento.

Finalmente se calcula el tiempo de contacto que se define como: El intervalo de tiempo en que un punto de la pared del pozo permanece en contacto con la lechada de cemento, la cual está siendo desplazada bajo un régimen de flujo turbulento.

Se ha encontrado, estadísticamente, que con tiempos de contacto mínimos de 10 minutos se logran cementaciones primarias satisfactorias. Se aclara, que es difícil proporcionar un tiempo de contacto del orden de 10 minutos, en vista de que el volumen de cemento requerido para obtener dicho tiempo, generalmente es mayor que el necesario para alcanzar el intervalo a cementar. En el espacio anular se pueden utilizar espaciadores o colchones lavadores para obtener el tiempo de contacto deseado, si los gastos de bombeo y los volúmenes

de cemento no permiten un tiempo de contacto suficiente.

El tiempo de contacto que se calcula en el inciso (L), de la se cuela de cálculo presentada a continuación, corresponde a un punto del espacio anular situado a la profundidad de la zapata de la tubería de revestimiento.

A) Cálculos para el Diseño de una Cementación Primaria:

- a) Determinese la velocidad crítica en el espacio anular, para establecer un régimen de flujo turbulento, utilizando la siguiente expresión para la determinación de K' y η' , consúltese el Apéndice 1.

$$V_c = \left[\frac{1613 K' \left(\frac{96}{d_e} \right)^{\eta'}}{\rho} \right]^{\frac{1}{2 - \eta'}} \dots \dots \dots (13)$$

Siendo:

$$d_e = d_h - d_o \dots \dots \dots (5)$$

En la expresión (13) se ha considerado un:

$$N_{Re} = 3000$$

Donde:

- V_c = Velocidad crítica _____ Pies/seg.
- ρ = Densidad _____ Lb/gal.
- K' = Índice de consistencia _____ (lb \cdot seg $^{\eta'}$ /pie 2)
- η' = Índice de comportamiento de flujo _____ Adimensional
- d_e = Diámetro hidráulico _____ Pg.
- d_h = Diámetro del agujero _____ Pg.
- d_o = Diámetro externo de la tubería _____ Pg.

- b) Se procede a calcular el gasto, correspondiente a la velocidad crítica obtenida en el paso anterior, por medio de la ecuación siguiente, que se basa en las dimensiones del espacio anular:

$$q_c = 0.154 V_c (d^2 h - d^2 o) \dots \dots \dots (14)$$

Donde:

- q_c = Gasto crítico _____ Lt/seg.
 V_c = Velocidad crítica _____ Pies/seg.
 dh = Diámetro del agujero _____ Pg.
 do = Diámetro externo de la tubería _____ Pg.

- c) Obténgase la velocidad del fluido dentro de la tubería de revestimiento con la siguiente ecuación:

$$V = \frac{q_c}{0.154 d_i^2} \dots \dots \dots (15)$$

Donde:

- V = Velocidad _____ Pies/seg.
 q_c = Gasto crítico _____ Lt/seg.
 d_i = Diámetro interno de la tubería _____ Pg.

- d) Determínese el factor de fricción de Fanning, para flujo en el espacio anular y dentro de la tubería de revestimiento, mediante la Fig. 11, o utilizando la ecuación siguiente:

$$f = 0.00454 + 0.645 (NRe)^{-0.70} \dots \dots \dots (16)$$

Donde:

$$N_{Re} = \frac{1.86 V^{(2 - \eta')}}{K' (96/d)^{\eta'}} \dots \dots \dots (17)$$

- f = Factor de fricción de Fanning _____ Adimensional
- N_{Re} = Número de Reynolds _____ Adimensional
- V = Velocidad _____ Pies/seg.
- ρ = Densidad _____ Lb/gal.
- K' = Índice de consistencia _____ Lb \cdot seg $^{\eta'}$ / pie 2 .
- η' = Índice de comportamiento de flujo _____ Adimensional

Para la lechada de cemento en el espacio anular, se considera:

$$N_{Re} = 3000$$

- e) Calcúlense las caídas de presión por fricción en el espacio anular y en el interior de la tubería, aplicando la ecuación siguiente:

$$P'_f = \frac{f L V}{25.8 d} \dots \dots \dots (18)$$

Donde:

- P'_f = Calda de presión por fricción _____ Lb/pg 2 .
- f = Factor de fricción de Fanning _____
- ρ = Densidad _____ Lb/gal.
- V = Velocidad _____ Pies/seg.
- d = Diámetro _____ Pg.

- f) Se determina la diferencia de presión hidrostática debida a la diferencia de densidades del lodo de perforación y los fluidos colocados en el espacio anular mediante la expresión siguiente:

$$P_h = 0.052 L \Delta \rho \quad \dots \dots \dots (19)$$

Donde:

P_h = Diferencia de presión hidrostática ————— Lb/pg².

L = Longitud ————— Pies

$\Delta \rho$ = Diferencia de densidades — Lb/gal.

- g) Calcúlese la presión total requerida en la superficie, para desplazar la lechada de cemento al espacio anular, con la siguiente expresión:

$$P_s = P_{fa} + P_{ft} + P_h \quad \dots \dots \dots (20)$$

Donde:

P_s = Presión total en la superficie ————— Lb/pg².

P_{ft} = Caída de presión por fricción en la tubería ————— Lb/pg².

P_{fa} = Caída de presión por fricción en el espacio anular — Lb/pg².

- h) Determínese el gradiente de presiones ejercido por la columna de lodo y cemento y compárese con el gradiente de presiones de fracturamiento de la formación (G_f):

$$G_c = \frac{P_{fa} + P_{ha}}{\rho} \quad \dots \dots \dots (21)$$

Donde:

- G_c = Gradiente de presiones -
de los fluidos ————— Lb/pg²/pie
- P_{fa} = Pérdidas de presión por
fricción en el espacio -
anular ————— Lb/pg².
- P_{ha} = Presión hidrostática en
el espacio anular ————— Lb/pg².
- D' = Profundidad ————— Pies

Si: $G_c > G_f$; efectúese el diseño según la técnica de flujo laminar.

Si: $G_c < G_f$; Continúese con el siguiente inciso.

- i) Calcúlese la potencia necesaria en el equipo superficial de bombeo, para desplazar la lechada al espacio anular, mediante la expresión siguiente:

$$H_h = 924 \times 10^{-5} P_s Q_c \dots \dots \dots (22)$$

Donde:

- H_h = Potencia hidráulica ————— hp
- P_s = Presión total en la super_
ficie ————— Lb/pg².
- Q_c = Gasto crítico ————— Lt/seg.

- j) Con la siguiente expresión, cuantifíquese el volumen total - de la lechada de cemento para alcanzar el nivel deseado dentro del espacio anular. Con la finalidad de considerar posi- bles irregularidades en el pozo, se recomienda incrementar - en un 10 a 15 % el volumen calculado de la lechada de cemen- to.

$$V_c = 0.154 \left[L_a (dh^2 - do^2) + L di^2 \right] \dots \dots \dots (23)$$

Donde:

- V_c = Volumen de la lechada de cemento _____ Lt.
 L_a = Longitud considerada en el espacio anular _____ Pies
 dh = Diámetro del agujero _____ Pg.
 do = Diámetro externo de la tubería _____ Pg.
 di = Diámetro interno de la tubería _____ Pg.
 L = Longitud _____ Pies

k) Se calcula el tiempo de desplazamiento necesario para colocar la lechada de cemento en el espacio anular, por medio de la expresión:

$$t = \frac{V_t}{G_o q_c} \dots \dots \dots (24)$$

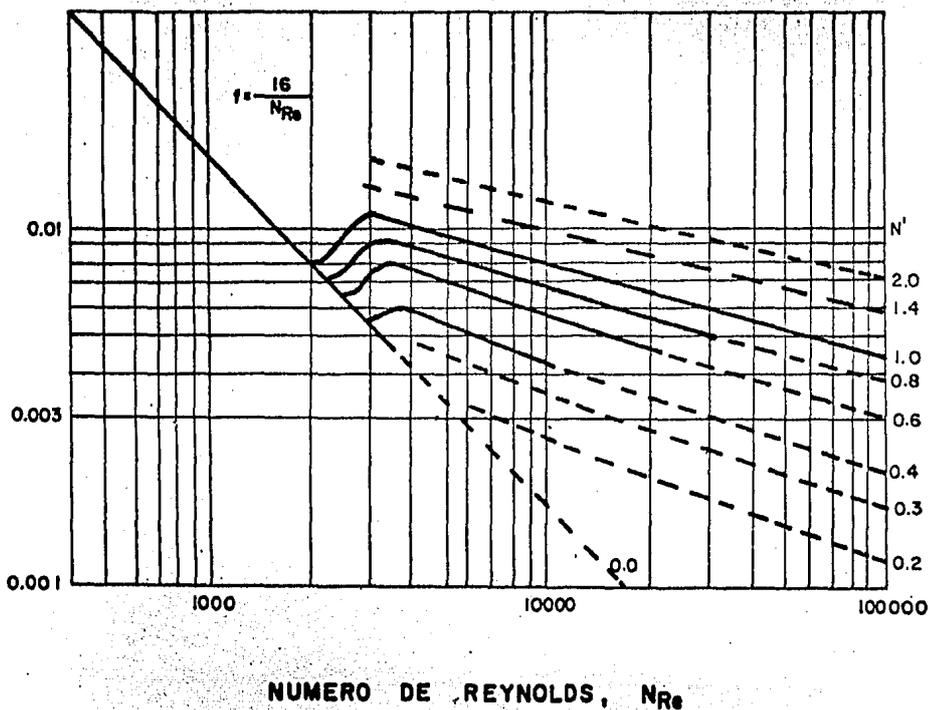
Donde:

- t = Tiempo _____ Min.
 V_t = Volumen total dentro de la tubería _____ Lt.
 q_c = Gasto crítico _____ Lt/seg.

l) Se calcula el tiempo de contacto, aplicando la ecuación siguiente:

$$t_c = \frac{V_c}{G_o q_c} \dots \dots \dots (25)$$

FACTOR DE FRICCIÓN DE FANING, f .



REGION EXPERIMENTAL ———
REGION EXTRAPOLADA - - - -

FIG. 11 FACTOR DE FRICCIÓN PARA FLUIDOS NO-NEWTONIANOS.

Donde:

t_c = Tiempo de contacto _____ Min.

V_c = Volumen de la lechada de
cemento _____ Lt.

q_c = Gasto crítico _____ Lt/seg.

El ejemplo siguiente, ilustra el uso del procedimiento antes descrito.

EJEMPLO 3 :

Diséñese la cementación de una tubería de revestimiento de - -
6 5/8", combinada de N-80 24 Lb/pie y J-55 24 Lb/pie, en agujero de
8 3/4", en el intervalo de 1500 m. a 2000 m., según la técnica de -
flujo turbulento. El gradiente de fracturamiento de la formación ex
puesta en el pozo es $G_f = 0.73 \text{ Lb/pg}^2/\text{pie}$ y se dispone de los datos
siguientes:

Tubería de 6 5/8", J-55, 36 Lb/pie cementada a:	490	m.
Agujero de 8 3/4" de:	490 a 2000	m.
Densidad de la lechada de cemento	15	Lb/ga.
Densidad del lodo de perforación	11.5	Lb/gal.
n' de la lechada de cemento	0.94	
n' del lodo de perforación	0.81	
K' de la lechada de cemento	0.00166	Lb-seg $^{n'}$ /pie 2
K' del lodo de perforación	0.0027	Lb-seg $^{n'}$ /pie 2
Solución dispersante de arcillas	10	bbL.

- a) Velocidad crítica para establecer régimen de flujo turbulento en el espacio anular.

$$V_c = \left(\frac{1613 \times 0.00166 (96/2.125)^{0.94}}{15} \right)^{\frac{1}{2 - 0.94}}$$

$$V_c = 5.6 \text{ pie/seg.}$$

Siendo:

$$d_e = 8.750 - 6.625 = 2.125$$

- b) Gasto crítico:

$$q_c = 0.154 \times 5.6 (8.750^2 - 6.625^2)$$

$$q_c = 28.17 \text{ Lt/seg.}$$

- c) Velocidad del fluido dentro de la tubería:

$$V = \frac{28.17}{0.154 (5.921)^2}$$

$$V = 5.14 \text{ Pie/seg.}$$

- d) Número de Reynolds y factor de fricción:

$$N_{Re} = \frac{1.86 \times 5.14 (2 - 0.81) \times 11.5}{0.0027 \left(\frac{96}{5.921} \right)^{0.81}}$$

$$N_{Re} = 5808$$

Con:

$$N_{Re} = 3000 \text{ y } \eta' = 0.94, \quad f = 0.01$$

$$N_{Re} = 5808 \text{ y } \eta' = 0.81, \quad f = 0.008$$

e) Cargas de presión por fricción:

En el Espacio Anular:

$$P_{fa} = \frac{0.01 \times 500 \times 3.28 \times 15 \times 5.6^2}{25.8 \times 2.125}$$

$$P_{fa} = 140.8 \text{ Lb/pg}^2.$$

En el Interior de la Tubería de Revestimiento:

$$P_{ft} = \frac{0.008 \times 2000 \times 3.28 \times 11.5 \times 5.14}{25.8 \times 5.921}$$

$$P_{ft} = 104.1 \text{ Lb/pg}^2.$$

El proceso de cálculo se repite desde el inciso (d), para determinar las cargas de presión por fricción debidas al dispersante de arcillas y al lodo de perforación en el espacio anular, obteniéndose:

Para el Dispersante de Arcillas:

$$P_{fa} = 6.8 \text{ Lb/pg}^2.$$

Para el Lodo de Perforación en el Espacio Anular:

Desde el extremo inferior de la tubería de 9.5/8", hasta la profundidad a que se encuentra el dispersante de arcillas, las cargas de presión por fricción son:

$$P_{fa} = 139 \text{ Lb/pg}^2.$$

Y desde la superficie hasta el extremo inferior de la tubería de 9 5/8".

$$P_{fa} = 60 \text{ Lb/pg}^2.$$

f) Diferencia de presiones hidrostáticas:

ENTRE: ——— CEMENTO - LODO

$$P_h = 0.052 (491 \times 3.28) (15 - 11.5)$$

$$P_h = 293.125 \text{ Lb/pg}^2.$$

ENTRE: ——— DISPERSANTE DE ARCILLAS - LODO

$$P_h = 0.052 (96 \times 3.28) (11.5 - 8.34)$$

$$P_h = 51.729 \text{ Lb/pg}^2.$$

Obteniéndose finalmente:

$$P_h = 293.125 - 51.729$$

$$P_h = 241.396 \text{ Lb/pg}^2.$$

g) Presión total requerida en la superficie para desplazar la lechada de cemento al espacio anular:

CAIDAS DE PRESION POR FRICCION EN EL ESPACIO ANULAR

Lechada de cemento	140.80	Lb/pg ² .
Dispersante de arcillas	6.80	Lb/pg ² .
Lodo de perforación	<u>199.00</u>	Lb/pg ² .
SUB-TOTAL:	346.60	Lb/pg ² .

CAIDAS DE PRESION EN EL INTERIOR DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO

Lodo de perforación	104.10	Lb/pg ² .
Diferencia de presión hidrostática . .	<u>241.396</u>	Lb/pg ² .
SUB-TOTAL:		345.496 Lb/pg ² .

$$\underline{\underline{\text{PRESION TOTAL} = 692.096 \text{ Lb/pg}^2.}}$$

h) Gradiente de presiones de la columna de lodo y cemento:

Caidas de presión por fricción en el espacio anular:

$$P_{fa} = 346.60 \text{ Lb/pg}^2.$$

CARGA HIDROSTATICA EN EL FONDO DEL POZO

Lechada de cemento	1 285.71	Lb/pg ² .
Dispersante de arcillas	136.50	Lb/pg ² .
Lodo de perforación	<u>2 760.00</u>	Lb/pg ² .
		4 182.21 Lb/pg ² .

Por lo tanto:

$$G_c = \frac{346.6 + 4182.21}{6560}$$

$$G_c = 0.69 \text{ Lb/pg}^2/\text{pie}$$

Se observa que el gradiente de presiones de fracturamiento de la formación, $G_f = 0.73 \text{ Lb/pg}^2/\text{pie}$, es mayor que el gradiente ejercido por la columna de lodo y cemento. Por lo tanto, esta técnica es factible de aplicarse sin riesgo de dañar la formación.

- i) Potencia necesaria para desplazar la lechada de cemento al espacio anular.

$$Hh = 924 \times 10^{-5} \times 692.09 \times 28.4$$

$$Hh = 181.61 \text{ hp.}$$

- f) Volumen de lechada de cemento:

$$V_c = 0.154 \left[1640 (32.67) + 29.52 (35.05) \right]$$

$$V_c = 8410.47 \text{ Lt.}$$

Considerando un 15 % adicional:

$$V_c = 9672.04 \text{ Lt.}$$

- k) Tiempo de desplazamiento:

El volumen total dentro de la tubería de revestimiento es:

$$V_t = 0.154 (6560 - 29.52) 35.05$$

$$V_t = 35249.57 \text{ Lt.}$$

Por lo tanto:

$$t = \frac{35249.57}{28.17 \times 60}$$

$$t = 20.8 \text{ Minutos}$$

- l) Tiempo de contacto:

$$t_c = \frac{9672.04}{28.17 \times 60}$$

$$t_c = 5.7 \text{ Minutos}$$

Como el tiempo de contacto es menor de 10 minutos, deberá aumentarse la longitud del colchón o bien aumentar la longitud de cementación si lo permite el gradiente de fracturamiento.

Al efectuar alguna modificación se repiten los cálculos a partir del inciso (e).

V.3.- TECNICA DE CEMENTACION PRIMARIA BAJO UN REGIMEN DE FLUJO LAMINAR:

En esta técnica se efectúa el desplazamiento de la lechada al espacio anular en régimen de flujo laminar. Se utiliza cuando se requiere cementar tubería a través de intervalos grandes, cementación de tuberías cortas a gran profundidad; o bien, cuando las características de las formaciones y equipo disponible no permiten emplear la técnica del flujo turbulento.

A) Procedimiento de Cálculo:

El procedimiento de cálculo es semejante al empleado en una cementación primaria bajo un régimen de flujo turbulento, diferenciándose en que para flujo laminar, la velocidad de desplazamiento, definida en la ecuación (26), se determina para un N_{Re} de 2000, considerando que la velocidad así obtenida, es la máxima que puede lograrse dentro de un régimen laminar. Por otra parte, no es recomendable trabajar velocidades de desplazamiento correspondientes a flujo incierto, esto es, dentro de la zona de transición entre flujo laminar y turbulento, ya que en esta zona, aunque no se logra establecer flujo turbulento, sí se desarrollan turbulencias aisladas, que propician la contaminación de la lechada de cemento con el lodo de perforación.

En caso de que el gradiente de presiones ejercido por la columna de lodo y cemento. Para la aplicación de esta técnica, resulte mayor que el de fracturamiento de las formaciones expuestas en el pozo, el diseño deberá efectuarse según la técnica de cementación por etapas.

En seguida se describe el método de cálculo para el diseño de una cementación primaria bajo un régimen de flujo laminar.

- a) Se calcula la velocidad máxima para mantener flujo laminar - en el espacio anular, utilizando la expresión:

$$V_c = \left(\frac{1075 K' (96/de)^{n'}}{\rho} \right)^{\frac{1}{2-n'}} \dots \dots \dots (26)$$

Donde:

- V_c = Velocidad crítica ————— Pies/seg.
 K' = Índice de consistencia ————— $\text{Lbf}\cdot\text{seg}^{n'}/\text{pie}^2$.
 n' = Índice de comportamiento
 de flujo —————
 de = Diámetro hidráulico ————— Pg.
 ρ = Densidad ————— Lb/gal .

Los siguientes pasos son análogos a los empleados en el procedimiento de diseño bajo un régimen de flujo turbulento, hasta el inciso (k). Las expresiones algebraicas no cambian, a excepción de las empleadas en el cálculo de las caídas de presión por fricción que a continuación se expresan:

Para el Espacio Anular:

$$P_{fa} = \frac{4p L V_c}{1000 (dh - do)^2} + \frac{L T \gamma}{200 (dh - do)} \dots \dots \dots (27)$$

Donde:

- P_{fa} = Pérdidas de presión por fricción en el espacio anular _____ Lb/pg².
 μ_p = Viscosidad plástica _____ cP
 L = Longitud _____ Pies
 V_c = Velocidad crítica _____ Pies/seg.
 d_h = Diámetro del agujero _____ Pg.
 d_o = Diámetro externo de la tubería _____ Pg.
 τ_y = Punto cedente de Bingham _____ Lb/100 pies².

Para el interior de la tubería:

$$P_{ft} = \frac{\mu_p L v}{1500 d_i^2} + \frac{L \tau_y}{225 d_i} \dots \dots \dots (28)$$

Donde:

- P_{ft} = Pérdidas de presión por fricción en el interior de la tubería _____ Lb/pg².
 μ_p = Viscosidad plástica _____ cP
 L = Longitud _____ Pies
 v = Velocidad _____ Pies/seg.
 d_i = Diámetro interno de la tubería _____ Pg.
 τ = Punto cedente de Bingham _____ Lb/100 pies².

V.4.- TECNICA DE CEMENTACION PRIMARIA POR ETAPAS:

Cuando no se puede tener una cementación satisfactoria, debido a las presiones altas, tiempos excesivos y capacidad del equipo debido a la profundidad, es recomendable esta operación. Dicha colocación, se logra a través de coples o juntas, diseñados específicamente.

te, que van distribuidos en la tubería de revestimiento de modo que quedan situados en la parte inferior de cada intervalo a cementar. - Al terminar las operaciones estos coples quedan herméticamente cerrados.

Esta técnica se utiliza para cementar tuberías de gran longitud a través de formaciones cuyo gradiente de presión de fracturamiento varía en forma irregular, o cuando no es posible efectuar la cementación en una sola etapa. También se recomienda su uso para aislar formaciones cuya distancia entre sí, no permiten efectuar la cementación en una sola etapa.

El método de diseño involucra determinar para cada etapa: El gradiente de presión ejercido por la columna de lodo y cemento, el volumen necesario de lechada de cemento, el tiempo de desplazamiento y la potencia requerida en el equipo superficial. Se explicará la técnica de cementación bajo régimen de flujo turbulento o de flujo laminar, según se juzgue conveniente. Esto significa que cada etapa se diseña como una sola cementación, pero se ejecuta como una sola.

CAPITULO VI

EJECUCION DE LA OPERACION DE CEMENTACION

Este Capitulo trata de la secuencia de operaciones que se realizan para cementar en un pozo la tubería de revestimiento.

C A P I T U L O V I

EJECUCION DE LA OPERACION DE CEMENTACION

Antes de iniciar la operación de cementación de una tubería de revestimiento, es indispensable que los equipos para manejo de cemento, lechada y lodo de desplazamiento estén completa y adecuadamente instalados.

La unidad móvil para mezcla y bombeo de la lechada, conocida como - - equipo de cementación, debe quedar instalada junto a la estiba de sacos de cemento o los silos de almacenamiento a granel. En este tipo de operación se maneja un gran volumen de cemento, que requiere, para producir la lechada, de un volumen también grande de agua, a utilizar en corto tiempo. Su abastecimiento debe quedar asegurado por medio de almacenamiento suficiente o un suministro seguro por tubería, complementado por los tanques del equipo de cementación.

VI.1.- DESARROLLO DE LAS OPERACIONES:

a) Colocación de Elementos de Flotación y Accesorios:

Tales elementos deben colocarse en la forma previamente - programada, comprobando además el buen funcionamiento de las - válvulas de retención.

b) Velocidad de Introducción de la Tubería:

La velocidad a la cual debe introducirse la tubería varía dentro de un rango de 10 a 34 segundos por cada tramo, con base en normas API aplicables a cada situación, a fin de no inducir pérdidas de lodo. A fin de lograr una velocidad de descenso - uniforme, debe irse ajustando el freno amortiguador (hidráulico

o electromagnético), de acuerdo con la carga creciente que se irá manejando.

c) Comprobación del Funcionamiento de los Elementos de Flotación:

Es conveniente efectuar esta operación cuando se lleven in troducidos 4 ó 5 tramos, circulando durante 5 minutos para verificar que no exista restricción alguna en los usados.

d) Instalación Correcta de Tapón o Tapones para Desplazamiento:

Deberá asegurarse la correcta de los tapones dentro de la cabeza de cementación, verificando además que dichos tapones - sean los indicados para el peso y diámetro de la tubería de re- vestimiento usada. Se está introduciendo el uso de un tapón de diafragma con objeto de limpiar las paredes de la tubería; debe rá desplazarse por delante de la solución lavadora (dispersante de arcillas).

e) Ejecución del Programa de Circulación:

Debe cumplirse el programa previamente elaborado, procuran do que al iniciar la circulación, la tubería sea movida lenta- mente hacia arriba, para ayudar a romper las condiciones estáti cas del lodo. La velocidad de bombeo será la mínima posible al iniciar la circulación incrementándola posteriormente hasta que alcance un valor adecuado.

f) Solución de Lavado:

Deberá prepararse un volumen de solución dispersante de ar cillas, para que, bombeado por delante del cemento, efectúe un lavado de la pared del pozo, proporcionando con ello mejores - condiciones para lograr una buena adherencia.

0

g) Características de la Lechada de Cemento:

La densidad del cemento debe ser mayor solamente en 0.05 - gr/cm³. a la del lodo de perforación, con objeto de no incrementar apreciablemente las presiones hidrostáticas ejercidas sobre las formaciones expuestas.

h) Características del Volumen en las Presas:

Checar que el volumen en las presas, sea el suficiente para efectuar el desplazamiento de la lechada de cemento.

i) Desplazamiento de la Lechada de Cemento con Flujo Turbulento:

Se procurará desplazar el cemento en régimen turbulento, - cuando ascienda por el espacio anular. Para conocer la velocidad de ascenso, deberá saberse el gasto que se bombea, utilizando para ello un medidor de flujo o calculándolo con base en la operación de la bomba (velocidad, cilindrada y eficiencia).

El tiempo empleado en el desplazamiento deberá ser, aproximadamente, el calculado según la eficiencia de la bomba.

En los casos en que no se tenga la seguridad respecto al buen funcionamiento de las bombas del equipo; efectuará el desplazamiento con el equipo de cementación, donde se miden directamente los volúmenes. En estos casos es conveniente verificar que las descargas de las bombas del equipo de perforación, sean las apropiadas para el abastecimiento del equipo de cementación.

j) Movimiento de la Tubería de Revestimiento:

Durante el bombeo del cemento y su desplazamiento, se moverá la tubería de revestimiento alternativamente hacia arriba de 9 m., para desarrollar el trabajo recomendado a los raspadores,

suspendiendo el movimiento al arribar el tapón al cople.

k) Comprobación de la Llegada del Tapón de Desplazamiento:

Debe verificarse la llegada del tapón con unos 35 Kg/cm^2 .- de presión, sobre la observada, antes de detenerse el mismo, al final del desplazamiento.

l) Comprobación del Funcionamiento Final de los Elementos de Flotación:

Una vez arribado el tapón al cople, debe descargarse la presión a cero y dejarse abiertas las válvulas de la cabeza de cementación. Si se observa flujo procedente de la tubería de revestimiento, ya sea por fallas de ella o del equipo de flotación, deberán cerrarse las válvulas arriba citadas.

VI.2.- DESPLAZAMIENTO DE LA LECHADA:

Una vez introducida ya toda la tubería por cementarse, se procede a circular con el fin de sacar todo el enjarre que pueda haber en el espacio anular y los recortes que hayan sido desprendidos por la acción de los centradores y raspadores.

Instalada la cabeza de cementación, se comprueba la circulación y enseguida se suelta el primer tapón (de diafragma) seguido de una solución dispersante, el cual nos va a efectuar una operación de limpieza en la pared exterior de la tubería y la pared del pozo, para lograr una mejor adherencia del cemento con la tubería y la pared del pozo. Enseguida se bombea la lechada de cemento mezclada con los aditivos necesarios y la presión necesaria para lograr durante el desplazamiento de la misma, un flujo turbulento en el espacio anular.

Después de haber bombeado la lechada, se suelta el tapón superior (tapón sólido), para desplazar la lechada de cemento y a la vez impedir que ésta sea contaminada por el lodo, con el cual se va a efectuar el desplazamiento.

CAPITULO VII

EVALUACION DE RESULTADOS

Este Capitulo trata de las pruebas que se realizan en el pozo a fin de evaluar el resultado del trabajo de cementación.

CAPITULO VII

EVALUACION DE RESULTADOS

La tecnología de la Industria Petrolera, en la terminación de pozos es tan avanzada que se requiere de una mayor atención en los trabajos de cementación en tuberías de revestimiento, para obtener una buena adherencia con la tubería de revestimiento y pared del pozo.

Como resultado de estas necesidades se ha hecho necesario que la evaluación de la calidad de la cementación sea lo suficientemente precisa para evitar pérdidas en la producción y trabajos de reparación posteriores, lo que ha traído como consecuencia, el mejoramiento del diseño del equipo y la técnica de interpretación de la información que proporcionan los registros de cementación.

Hay diversas formas de conocer después de la cementación, la distribución del cemento, su resistencia y su adherencia a la tubería de revestimiento y la pared del pozo.

VII.1.- PRUEBAS DE PRESION:

A) Prueba de la Tubería:

Después de instalar la tubería de revestimiento en su colgador, tras un tiempo de fraguado de 18 a 24 horas, reinstalados los preventores y hecha la limpieza interior de la tubería con barrena o barrena y escariador hasta el tapón alojado arriba del cople flotador. Se realiza la prueba de presión de la tubería de revestimiento y sus conexiones superficiales. Con preventor cerrado se aplica presión al espacio anular, alcanzando un valor igual al de la presión de prueba, especificada.

para el elemento de menor capacidad del sistema, manteniendo tal presión durante unos 30 minutos, para observar si hay abatimiento o no. El resultado positivo o negativo de esta prueba de presión se referirá solamente a la tubería de revestimiento, cabezal y preventor; pero de ninguna manera a la cementación ya que el extremo inferior de la tubería está perfectamente obturado.

B) Prueba de Presión a la Cementación:

Cuando la tubería cementada no es la última del pozo, sino que se seguirá perforando, después de haber efectuado la prueba de presión a la tubería de revestimiento, se perforarán los taponos alojados en el cople y zapata flotador y alrededor de un metro abajo de la zapata de la tubería, se hará una nueva prueba, aplicando una presión algo superior a la presión de formación. Si la presión se sostiene durante un lapso de unos 30 minutos, la cementación probablemente es buena en la cercanía inmediata de la zapata y la formación resiste al fracturamiento. Si la presión se abate no se sabe si falla la cementación o la formación. En caso de observarse descarga de lodo al abrirse la válvula que controla el espacio anular, entre la tubería recién cementada y la anterior, esto es, habiendo circulación durante la prueba, entonces la cementación quedó pésima.

De lo anterior se deduce que las pruebas de presión no son concluyentes para la evaluación de la cementación.

VII.2.- REGISTRO SONICO DE CEMENTACION:

Este registro se efectúa en las cementaciones con el propósito de conocer la cima de la lechada en el espacio anular, así como

poder evaluar la efectividad de la cementación, ya que con la ayuda de dichos registros, se puede determinar donde está defectuosa.

En el pasado, se usó mucho tiempo el registro de temperatura para evaluar la eficiencia de las cementaciones. Sólo indicaban la presencia de cemento detrás de la tubería de revestimiento, mas no si estaba adherida a ésta. Tal registro ha venido a ser substituído con ventaja, por el registro sónico de cementación, que si permite determinar el grado de adherencia del cemento a la tubería de revestimiento, así como su resistencia a la compresión. Se emplea lo mismo en cementaciones primarias que en cementaciones forzadas.

A) Principio de Medida:

El registro sónico de cementación se basa en la atenuación de la amplitud del primer arribo de una onda acústica, por efecto de la adherencia entre la tubería de revestimiento y el cemento.

La amplitud de la primera onda que llega al receptor, varía según las condiciones de cementación de la tubería; es máxima en presencia de tubería libre y es mínima cuando la tubería está perfectamente cementada, experimentos de laboratorio, han demostrado que la atenuación de una onda acústica que viaja a través de una tubería de revestimiento cementada, es proporcional al porcentaje de circunferencia con buena adherencia del cemento.

La Fig. 12, ilustra un ejemplo de un registro tomado en una tubería bien cementada, y la Fig. 13 muestra esquemáticamente los valores relativos de la amplitud en los casos extremos e intermedios.

B) Variables que Influyen en el Registro Sónico de Cementación:

Los análisis teóricos y los experimentos de laboratorio a escala, han indicado que las variables, de las cuales depende la amplitud de la onda acústica de un registro sónico de cementación son, principalmente la resistencia del cemento a la compresión, el espesor de la tubería de ademe y el grado de adherencia y distribución periférica del cemento. Otras variables menores son el diámetro de la tubería de ademe, el espesor del cemento, excentricidad de la sonda, presión de cementación.

a) Resistencia del Cemento a la Compresión:

Los experimentos de laboratorio mencionados antes, de muestran que existe una relación definida entre la resistencia del cemento a la compresión y la atenuación de la onda acústica. La resistencia del cemento aumenta con el tiempo de fraguado. La Fig. 14 indica, esquemáticamente, la relación entre la atenuación y la resistencia del cemento a la compresión. Esta relación es independiente del tipo de cemento, de la temperatura y presión durante el fraguado.

b) Efecto de la Tubería de Ademe:

Mientras menor sea el diámetro de la tubería de revestimiento habrá un mejor acoplamiento acústico. Esto da por resultado, una amplitud mayor de la onda conforme el diámetro de la tubería disminuye. Este efecto también es válido en tuberías cementadas, pero la amplitud de la onda será menor, para una misma tubería.

La Fig. 15 muestra, esquemáticamente, la relación entre el diámetro de la tubería y la amplitud de la onda acústica.

Si la tubería está libre, el ritmo de atenuación es independiente de su espesor. Pero si está cementada, el efecto de atenuación sí depende del espesor de la tubería. Para una resistencia dada del cemento, si el espesor de tubería disminuye, el ritmo de atenuación de la señal aumenta, como se demuestra en el Esquema de la Fig. 16

c) C e m e n t o :

Los experimentos de laboratorio, demuestran que, para una tubería cementada los efectos de atenuación máxima ocurren cuando el espesor del cemento en el espacio anular alcanza un valor de 19 mm. (3/4"). Espesores mayores de cemento no producen ningún efecto adicional. En general, en la gran mayoría de los pozos se tiene un espacio anular entre agujero y tubería de revestimiento mayor de este valor; por ello, en la interpretación del registro sónico de cementación no se toma en cuenta el espesor del cemento.

C) Interpretación:

La interpretación puede ser cualitativa o cuantitativa. La primera consiste principalmente en la observación de las amplitudes medidas. La segunda se refiere, sobre todo, al cálculo de la resistencia del cemento a la compresión.

Para poder emitir un mejor juicio sobre la calidad de la cementación, es recomendable efectuar las dos interpretaciones. Una interpretación basada únicamente en el estudio de la amplitud de la señal puede conducir a un juicio erróneo. Suponiendo una misma calidad de la operación de cementación, la amplitud de la señal será función del espesor de la tubería y de su diámetro. Deben tomarse en cuenta estas variables.

El nomograma de la Fig. 17 permite determinar, en función de las variables de la tubería y de los valores obtenidos del registro sónico de cementación, la resistencia del cemento a la compresión. Su uso es muy fácil y está ilustrado con un ejemplo para una tubería de diámetro 178 mm. (7") y espesor de 10.3 mm. (0.408") y peso de 29 lb/pie. También los valores de resistencia a la compresión así calculados, están sujetos a interpretación. Los cálculos de resistencia son seguros cuando se satisfacen las siguientes condiciones principales:

- Sonda y tubería de revestimiento centrados.
- Espesor del cemento de 19 mm. (3/4") o mayor.
- Que no se hayan aplicado presiones excesivas u otros esfuerzos dentro de la tubería antes de tomar el registro sónico de cementación.
- Que el valor calculado concuerde razonablemente con el esperado para el tipo de cemento usado, condiciones y tiempo de fraguado.
- Que no haya interferencias acústicas, debidas a señales provenientes de la formación, con la señal de la tubería de revestimiento.
- Que se observen valores de amplitud razonablemente uniformes en zonas en donde el agujero es casi del mismo diámetro de la barrena.

Puede suceder que el valor de la resistencia a la compresión calculada resulte anormalmente muy bajo. Esto puede deberse a varias causas. El cemento pudo haberse contaminado con el lodo, se pudo haber canalizado, o bien la adherencia a la tubería de revestimiento se pudo haber alterado por algún esfuerzo interno de la tubería. Estos efectos no pueden sepa-

narse. Se consideran dentro de un término llamado "Índice de Adherencia".

El índice de adherencia está dado por la relación del ritmo de atenuación observado en la zona de interés al ritmo de atenuación en una zona que se considere que está completamente cementada, según el registro. Estos ritmos de atenuación - - (db/pie) se determinan por medio del nomograma de la Fig. 17

Puede suceder que no se pueda encontrar una zona de referencia de atenuación máxima, o sea una zona bien cementada; en tonces, este valor se puede estimar utilizando como argumento la resistencia del cemento dado; luego se procede a la inversa con el nomograma para obtener el ritmo de atenuación esperado en el eje marcado en db/pie.

Si se tiene la certeza de que no hubo contaminación del cemento ni se ocasionó daño a la adherencia, es muy probable que la resistencia baja calculada se deba a canalización del cemento. En este caso, el índice de adherencia será una medida del grado de canalización del cemento. En la Fig. 18, se muestran resultados de laboratorio que indican que el índice de adherencia modificado por la canalización, es prácticamente proporcional a la parte de circunferencia de cemento adherido a la tubería.

Se ha encontrado que las condiciones de la superficie de la tubería tienen efecto sobre el grado de adherencia del cemento. Una superficie enmohecida o de una tubería usada, o bien una recientemente pulida, producen buena adherencia con el cemento. En cambio una superficie cubierta con grasa reduce la adherencia.

Se han tomado registros sónicos de cementación antes y después de efectuar cementaciones forzadas. A veces, hay indicación de daño a la cementación primaria. Este daño es mayor mientras más quebradizo es el cemento.

EJEMPLOS:

La Fig. 19 ilustra el efecto del tiempo después de la cementación sobre el registro sónico de cementación. Se puede notar que la adherencia del cemento a la tubería se produce en un tiempo menor frente a las formaciones permeables, areniscas en este caso, que frente a lutitas o zonas lutíticas. La explicación que dan algunos autores a este hecho es que el cemento pierde agua frente a las zonas permeables, fraguando más rápidamente. Al cabo de 28 horas, la adherencia fué completa frente a las areniscas, y después de 33 horas lo fué en todo el intervalo. Esto indica que para interpretar el registro sónico de cementación hay que tomar en cuenta el tiempo transcurrido después de cementado el pozo.

Se ha observado que en algunos casos, en donde el diámetro del agujero es mayor que el de la barrena, debido a derrumbes de la formación, la adherencia del cemento es menos eficiente. Sin embargo, también puede ocurrir que haya poca adherencia en agujeros de diámetro igual al de la barrena. A veces se encuentra que hay una buena adherencia en los intervalos donde se usan raspadores en la tubería.

La Fig. 20 ilustra otro ejemplo de campo de registro sónico de cementación en donde las rocas porosas y permeables están constituidas por carbonatos. Para mejor compresión e interpretación más amplia del registro de cementación, se han

agregado los registros de potencial espontáneo, el microlog y el de calibración de agujero. Se puede observar mucho de lo mencionado en el párrafo anterior. En donde el diámetro del agujero es notablemente mayor que el de la barrena, por ejemplo a la profundidad de 1300 m., prácticamente no hay adherencia aunque también ocurre esto en donde el diámetro del agujero es casi igual al de la barrena; por ejemplo, de 1425 a 1460 mts.. Sin embargo, la adherencia es buena en la mayoría de los intervalos porosos y permeables, por ejemplo de 1510 a 1560 m. y de 1850 a 1925 m..

También se puede observar poca adherencia en intervalos en donde la roca es impermeable y dura, aún cuando el diámetro es igual al de la barrena, como por ejemplo de 1715 - 1780 m..

Al interpretar los registros sónicos de cementación, hay que tomar en cuenta además, factores tales como grados de inclinación del pozo, fluidos que contiene la formación y, en algunos casos, si hubo perforación de la tubería de revestimiento antes de tomar el registro.

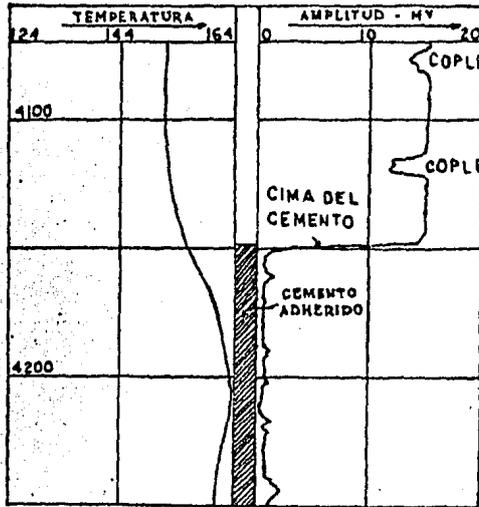


FIG.12 Ejemplo: DE UNA BUENA CEMENTACION. REGISTRO TOMADO 24 HORAS DESPUES DE LA CEMENTACION. A LA IZQUIERDA APARECE EL REGISTRO DE TEMPERATURA PARA COMPARACION.

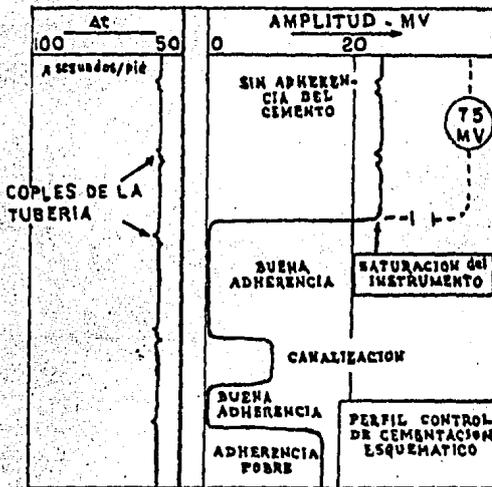


FIG.13 ESQUEMA QUE MUESTRA, COMPATIVAMENTE LOS VALORES — DEL REGISTRO SEGUN DIFERENTES SITUACIONES.

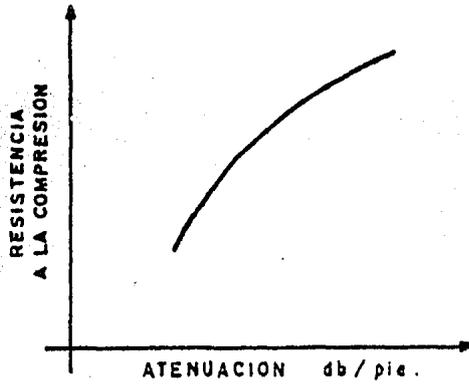


FIG.14 RELACION ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION Y LA ATENUACION.

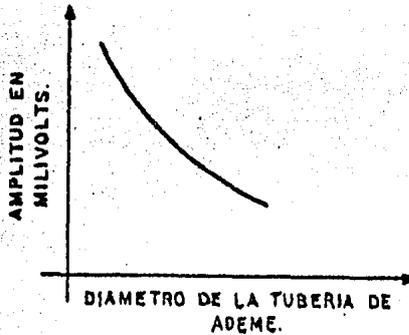


FIG.15 RELACION ENTRE EL DIAMETRO DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO Y LA AMPLITUD DE LA ONDA ACUSTICA.

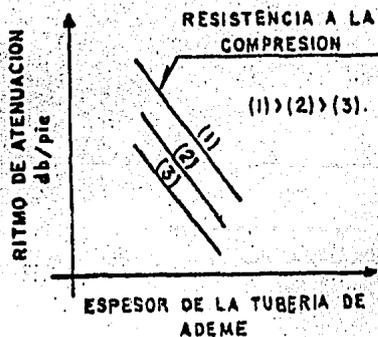
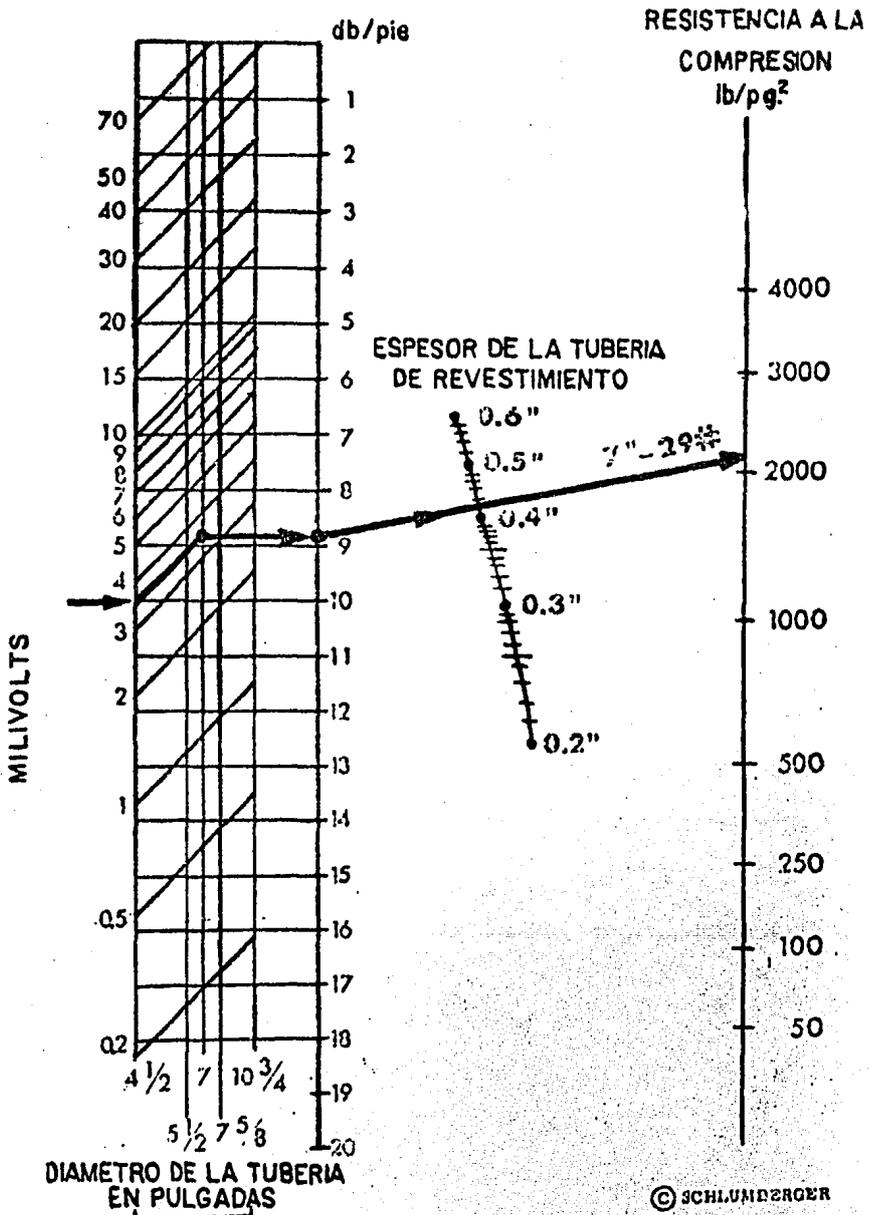


FIG.16 RELACION ENTRE EL ESPESOR DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO Y EL RITMO DE ATENUACION.



ESPACIAMIENTO DE 3 PIES

FIG.17 GRAFICA PARA INTERPRETACION CUANTITATIVA DEL REGISTRO SONICO DE CEMENTACION, SOLO PARA SONDA CENTRADA.

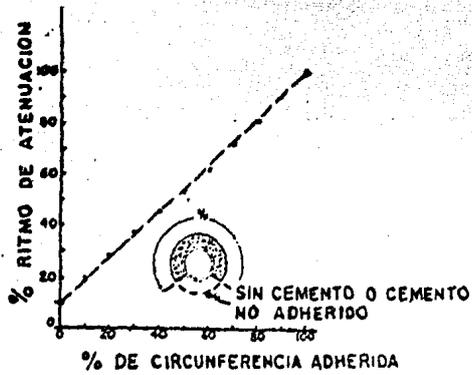


FIG. 18 PORCIENTO DE RITMO DE ATENUACION CONTRA PORCIENTO DE CIRCUNFERENCIA ADHERIDA.

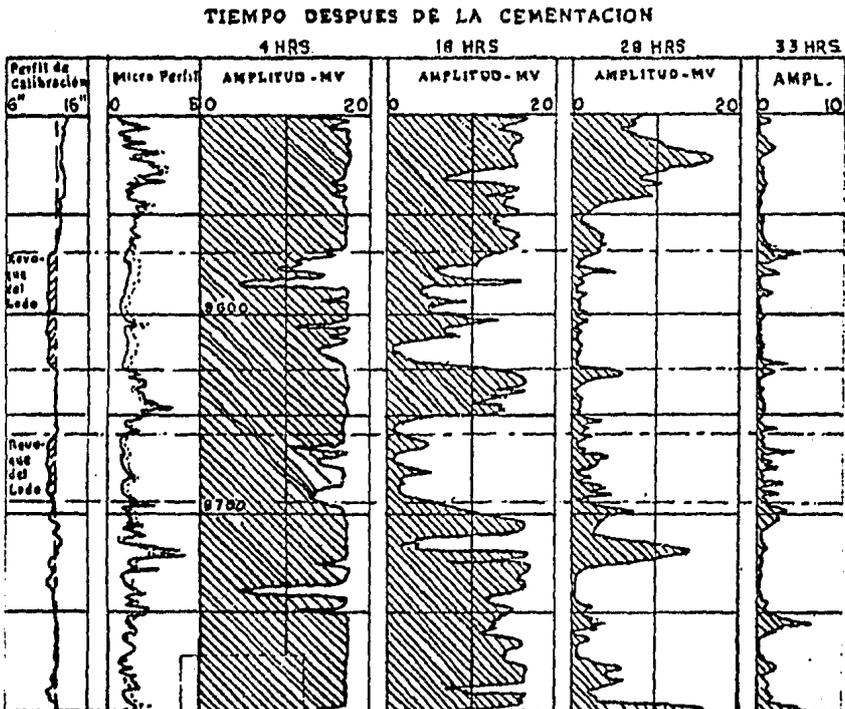


FIG. 19 VARIACION DE LA AMPLITUD DE LA SEÑAL DEL REGISTRO SONICO DE CEMENTACION CON EL TIEMPO DESPUES DE CEMENTADA LA TUBERIA DE ADEME.

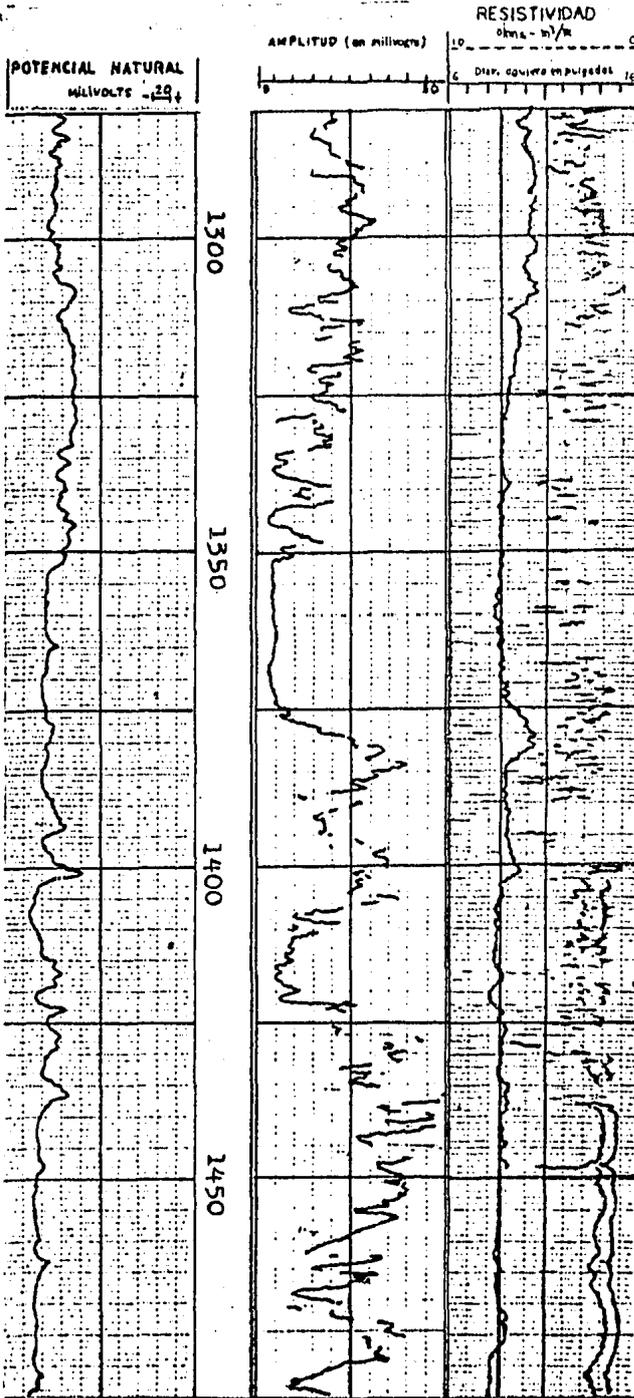


FIG.20 Ejemplo: DE UN REGISTRO SONICO DE CEMENTACION, QUE MUESTRA ZONAS CON BUENA Y MALA ADHERENCIA. LAS FORMACIONES POROSAS Y PERMEABLES SON DE CARBONATOS.

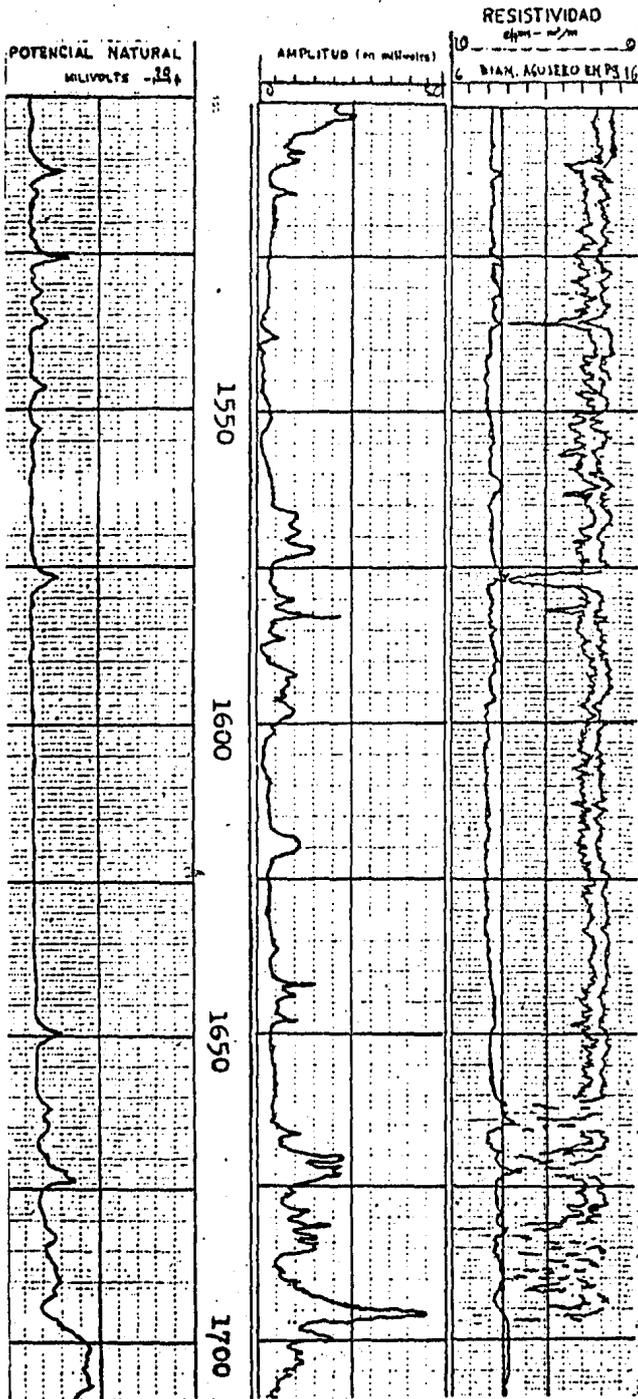


FIG.20 Ejemplo: DE UN REGISTRO SONICO DE CEMENTACION, QUE MUESTRA ZONAS CON BUENA Y MALA ADHERENCIA. LAS FORMACIONES POROSAS Y - PERMEABLES SON DE CARBONATOS. (Continuación)

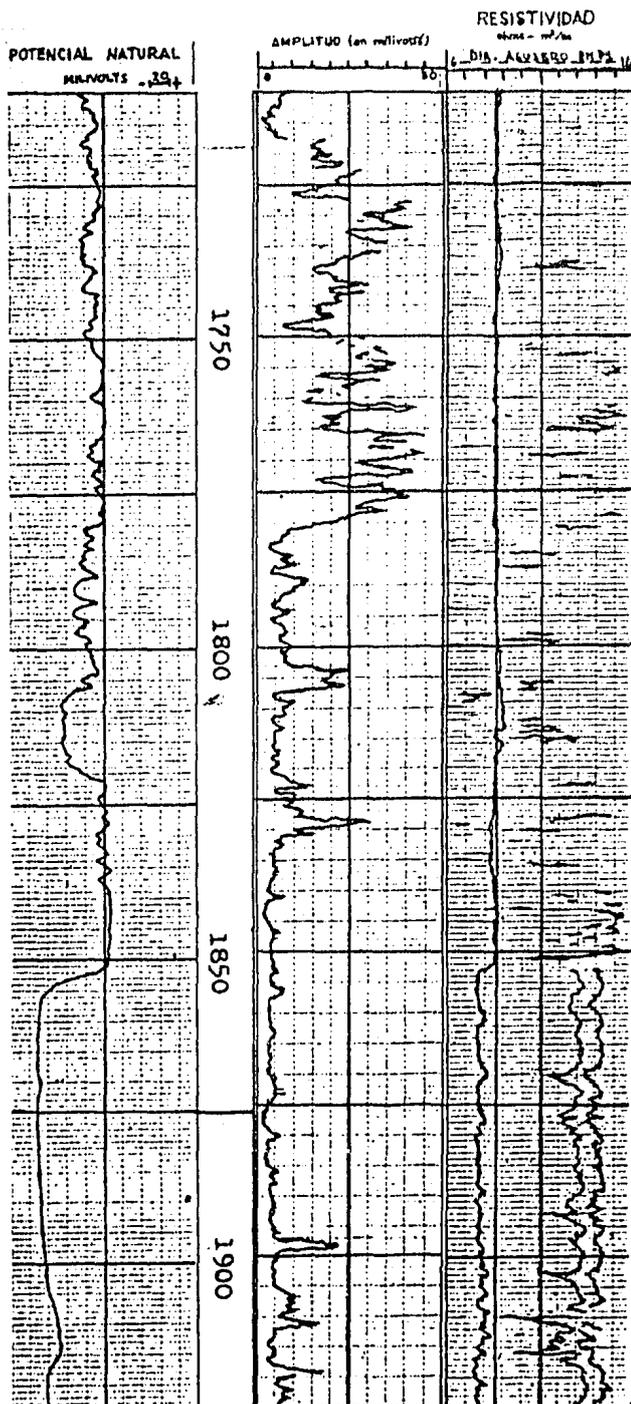


FIG. 20 Ejemplo: DE UN REGISTRO SONICO DE CEMENTACION, QUE MUESTRA ZONAS CON BUENA Y MALA ADHERENCIA. LAS FORMACIONES POROSAS Y PERMEABLES SON DE CARBONATOS. (Continuación)

CAPITULO VIII

DISCUSION DE CEMENTACIONES FALLIDAS

*Aquí se discuten fallas comunes en las ce
mentaciones, sus causas y consecuencias.*

CAPITULO VIII.

DISCUSIÓN DE CEMENTACIONES FALLIDAS

Aún cuando una cementación ideal (Fig. 21) nunca ocurre, todos los esfuerzos deberán ser hechos para buscar esta condición tanto como sea posible. La tubería de ademe debe ser rodeada de una cubierta de cemento de suficiente espesor y centrada en el agujero del pozo. De esta manera, la tubería de revestimiento es sostenida y la migración de fluidos es evitada por la adherencia del cemento a ambos, la tubería de revestimiento y la formación.

Las fallas más comunes en una cementación primaria pueden deberse a varios factores, siendo los principales los siguientes:

- A) Tubería pegada.
- B) No alcanzar el cemento la cima calculada.
- C) Canalización de la cementación.
- D) Deficiencia de centrado de la tubería de revestimiento.
- E) Falta de adherencia del cemento.

A) TUBERIA PEGADA:

Una tubería pegada, es aquella tubería que no tiene movimiento, ni en sentido horizontal ni vertical.

Varios son los factores causantes de la pegadura de una tubería de revestimiento, siendo los siguientes los más comunes:

- 1.- Falta de movimiento de la tubería de revestimiento.

- 2.- Pérdida de fluido que causa considerable aumento de la viscosidad, que hace que se pegue la tubería de revestimiento o por enjarre - exagerado.
- 3.- Atrapamiento de la tubería de revestimiento.
- 4.- Por circulación deficiente o insuficiente.

B) NO ALCANZAR EL CEMENTO LA CIMA CALCULADA:

Esto puede deberse dos causas enumeradas a continuación:

- 1.- Reducción de volumen debido a la pérdida de agua a la formación.
- 2.- No se conozca el volumen del pozo mediante derrumbes, donde el registro del calibre no da el valor exacto, por eso el volumen calculado no es el real.

C) CANALIZACION DE LA CEMENTACION:

La Fig. 22 ilustra la canalización típica de cemento donde la tubería de ademe descansa contra un lado del agujero del pozo. Hay un exceso de enjarre de lodo, y una película de éste se ha adherido a la tubería de revestimiento. En estas condiciones, aún si el cemento ha cubierto el espacio anular, ninguna adherencia será posible.

La canalización se produce por la diferencia de densidades del lodo y cemento, por no lograrse el flujo turbulento.

D) DEFICIENCIA DE CENTRADO DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO:

Se debe a un programa incorrecto de centradores, así como a la característica y resistencia del centrador.

Cuando la tubería de revestimiento no es centrada en el agujero del pozo, el lodo se gelatiniza en la parte donde la tubería de revestimiento descansa, y desvía al cemento. Además se forman deslaves con acumulación de lodo gelatinoso y recortes. El excesivo aumento de enjarre puede ser visto en las dos zonas permeables.

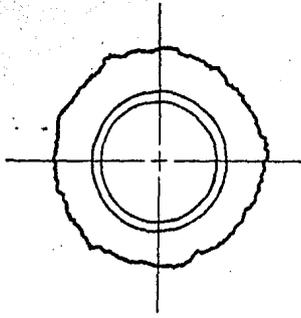


FIG. 21

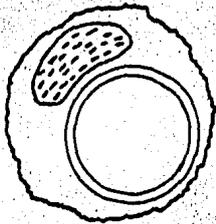


FIG. 22

A P E N D I C E 1

APENDICE 1

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE COMPORTAMIENTO DE FLUJO (η')
Y DEL ÍNDICE DE CONSISTENCIA (K')

Se ha demostrado que la mayoría de los fluidos No Newtonianos se ajustan al comportamiento representado en el modelo exponencial, que queda definido empíricamente por la ecuación siguiente:

$$\tau = K' \left(- \frac{dv_r}{dr} \right)^{\eta'} \dots \dots \dots (1.1)$$

Siendo dv_r/dr una expresión que representa la variación de la velocidad de corte con respecto al radio, desarrollada bajo un régimen de flujo laminar, dentro de una tubería circular. Sus unidades son seg^{-1} .

Dependiendo del valor de η' , los fluidos No Newtonianos se clasifican en: Plásticos de Bingham, pseudoplásticos y dilatantes.

El índice de comportamiento de flujo, para los fluidos plásticos de Bingham y pseudoplásticos siempre toma valores entre cero y uno. Para los dilatantes, η' es mayor que uno.

Los plásticos de Bingham, se diferencian de los pseudoplásticos, en que los primeros requieren que el esfuerzo de corte aplicado exceda un cierto valor mínimo, llamo "punto de cedencia", para mantenerlos en movimiento; mientras que los segundos no tienen punto de cedencia o sea que cualquier esfuerzo inicial aplicado exhiben una deformación.

La ecuación (1.1) también representa el comportamiento de los fluidos Newtonianos. En este caso $\eta' = 1$ y K' es proporcional a la viscosidad.

El lodo de perforación y la lechada de cemento, generalmente se comportan como fluidos plásticos de Bingham; sin embargo, dependiendo del tipo y cantidad de aditivos empleados en la lechada de cemento, pueden propiciar el cambio de comportamiento a tipo dilatante.

Los índices de comportamiento de flujo y de consistencia, se determinan con base en lecturas obtenidas en un viscosímetro rotacional, como el tipo Fann VG-35. Correspondientes a velocidades de 600, 300, 200 y 100 r.p.m.; ya sea siguiendo el método de los dos puntos, o gráficamente, a partir del modelo exponencial.

METODO DE LOS DOS PUNTOS

En este procedimiento sólo se emplean las lecturas a 600 y 300 r.p.m. Los valores de η' y K' se cuantifican con las ecuaciones siguientes:

$$\eta' = 3.32 \text{ Log } \frac{\theta 600}{\theta 300} \dots \dots \dots (1.2)$$

$$K' = N \frac{\theta 300}{100 \times 4.79 \eta'} \dots \dots \dots (1.3)$$

Con el método de dos puntos, también pueden obtenerse μ_p y τ_γ , utilizando las ecuaciones siguientes:

$$\mu_p = \theta 600 - \theta 300 \dots \dots \dots (1.4)$$

$$\tau_\gamma = \theta 300 - \mu_p \dots \dots \dots (1.5)$$

B I B L I O G R A F I A

- CEMENTACIONES: *Instituto Mexicano del Petróleo
Ing. Miguel Angel Benítez*

- ESTUDIO DE TECNICAS PARA CEMENTACIONES PRIMARIAS: *Instituto Mexicano del Petróleo*

- TECNICAS DE DESPLAZAMIENTO Y MATERIALES EMPLEADOS PARA CEMENTACIONES PRIMARIAS EN POZOS PROFUNDOS: *Distrito Frontera Noreste*

- PROGRAMA WEATHERFORD DE CEMENTACION: *Weatherford, Co.*

- CEMENTACION HALLIBURTON DE POZOS DE PETROLEO: *Cla. Halliburton*

- TECNICAS PARA DESPLAZAR CEMENTO: *Cla. Halliburton*

- CEMENTACION, INFORMACION TECNICA: *Dowell Schlumberger*

- MANUAL DE SERVICIOS Y ADITIVOS PARA CEMENTACION: *Cla. Halliburton*

- OPERACION Y MANTENIMIENTO PARA CEMENTACIONES, ACIDIFICACIONES Y FRACTURAMIENTO DE POZOS: *Instituto Mexicano del Petróleo*

- INTERPRETACION DE REGISTROS GEOFISICOS: *Ing. Orlando Gómez Rivero*